



UNIVERSIDAD DE ALMERÍA



FACULTAD DE CIENCIAS EXPERIMENTALES

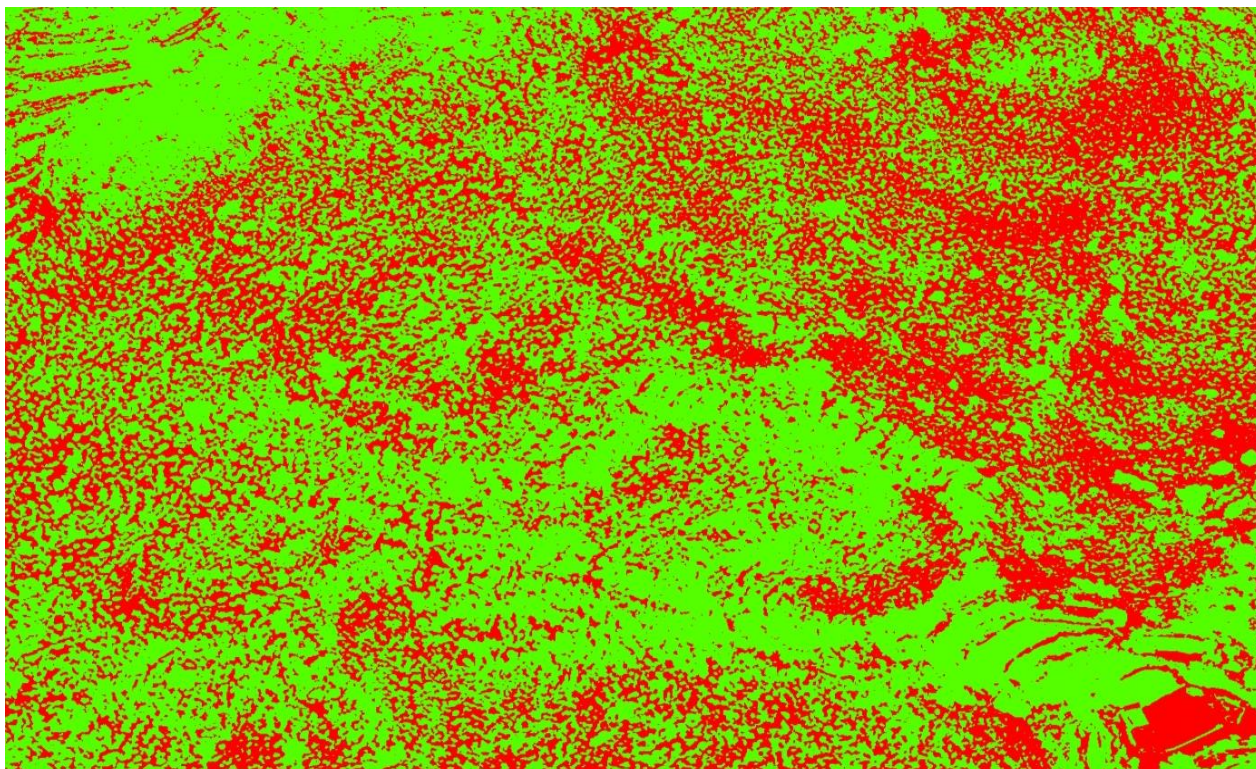
**TRABAJO FIN DE MÁSTER EN USO SOSTENIBLE DE RECURSOS
NATURALES Y SERVICIOS ECOSISTEMICOS**

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

BORJA RODRÍGUEZ LOZANO

EFFECTO DEL CAMBIO GLOBAL EN LOS ESPARTALES DEL SE IBÉRICO:
IMPORTANCIA DEL EFFECTO DE LA TOPOGRAFIA EN LA DISPONIBILIDAD DE
AGUA

EFFECT OF GLOBAL CHANGE IN THE *M. TENNACISSIMA* STEEPES FROM
SOUTHEAST IBERIAN PENINSULA: IMPORTANCE OF THE EFFECT OF
TOPOGRAPHY ON WATER AVAILABILITY



Directores:

M^a YOLANDA CANTÓN CASTILLA
EMILIO RODRÍGUEZ CABALLERO

2017/2018

Índice de contenidos

RESUMEN.....	1
PALABRAS CLAVE:	1
ABSTRACT	2
KEY WORDS:	2
1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS	3
2. MATERIAL Y MÉTODOS	6
2.1 Selección de las zonas de estudio:.....	6
2.2 Caracterización climática:	7
2.3 Índices topográficos: redistribución potencial de agua y radiación solar.....	8
2.4 Caracterización de la vegetación: cobertura y respuesta espectral.....	9
2.5 Análisis de los datos y proyecciones climáticas.....	10
3. RESULTADOS	12
3.1 Caracterización climática	12
3.2 Atributos topográficos.....	13
3.3 Cobertura vegetal y NDVI	14
3.4 Efecto de la topografía en el funcionamiento de los espartales mediterráneos	16
3.5 Predicciones climáticas y modelos de simulación de la respuesta de los espartales frente al cambio climático	17
4. DISCUSIÓN	20
5. CONCLUSIONES	24
6. AGRADECIMIENTOS	25
7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	25
ANEXO 1: TABLAS	33
ANEXO 2: FIGURA S1.....	36

"Lo gracioso es que mientras hablaba estaba pensando en otra cosa. Vivo en Nueva York y de pronto me acordé del lago que hay en Central Park, cerca de Central Park South. Me pregunté si estaría ya helado y, si lo estaba, adonde habrían ido los patos. Me pregunté dónde se meterían los patos cuando venía el frío y se helaba la superficie del agua, si vendría un hombre a recogerlos en un camión para llevarlos al zoológico, o si se irían ellos a algún sitio por su cuenta. Tuve suerte. Pude estar diciéndole a Spencer un montón de estupideces y al mismo tiempo pensar en los patos del Central Park"

El guardián entre el centeno

-J.D. Salinger-

RESUMEN

Los espartales son uno de los ecosistemas más representativos del SE de la península Ibérica. La aridez característica de esta región da lugar a paisajes abiertos con una cobertura vegetal dispersa dentro de una matriz de suelo desnudo, que actúan como sistemas complejos desde el punto de vista eco-hidrológico, donde la topografía juega un papel fundamental controlando los procesos de redistribución de agua entre los espacios abiertos y la vegetación. Este fenómeno maximiza la productividad de la vegetación y podría amortiguar las fuertes recesiones que se predicen para los espartales Mediterráneos como consecuencia del cambio climático. Para evaluar la respuesta de los espartales del SE Ibérico a cambios de precipitación y evapotranspiración y analizar el efecto de la topografía en su funcionamiento actual y futuro, hemos realizado un estudio de sustitución de espacio por tiempo en 17 parcelas situadas a lo largo de un gradiente que refleja los cambios en el clima que predice el IPCC para esta región, mediante el empleo de imágenes SENTINEL-2 e índices topográficos derivados de modelos digitales del terreno. Encontramos que la biomasa y la cobertura de los espartales presentan una clara estacionalidad controlada por el estado previo de la vegetación y la aridez. Además, el análisis de la relación entre el Índice de Vegetación Normalizado (NDVI) y variables topográficas relacionadas con la evapotranspiración y almacenamiento de agua en el suelo, demuestra que la topografía desempeña un papel fundamental en la cobertura, estructura espacial y dinámica del esparto, controlando las variaciones espaciales de NDVI, que presenta valores superiores en las zonas de acumulación de agua. El modelo desarrollado, que describe la respuesta de la vegetación (NDVI) a partir del estado previo de la vegetación, la aridez y del TWI (de sus siglas en inglés "Topographical wetness index"), predice una reducción del NDVI en los espartales mediterráneos para finales de siglo. Sin embargo, este efecto se verá amortiguado en las zonas de acumulación de agua de escorrentía, dando lugar a cambios en los patrones de distribución de la vegetación y a un nuevo equilibrio eco-hidrológico con una mayor concentración de vegetación en las zonas donde se favorece el almacenamiento de agua.

PALABRAS CLAVE:

Macrochloa tenacissima L., redistribución de agua, NDVI, cambio climático, ecosistemas mediterráneos semiáridos, topografía, distribución espacial.

ABSTRACT

M. tennacissima steppes are one of the most important ecosystems in the SE of Iberian peninsula. Biological activity within these ecosystems is mainly limited by, scarce precipitation and high potential evapotranspiration rates. As consequence of interactions between these factors vegetation, vegetation within these systems often appears forming patches surrounded either by bare soil or rocky patches. How these patches are organized across the landscape depend on how water sediments and nutrients are redistributed from open to vegetated patches. Water redistribution maximizes vegetation productivity and could cushion the strong recessions that are predicted for the Mediterranean alpha grass as a consequence of climate change. In order to evaluate the *M. tennacissima* steppes to changes in precipitation and evaporation and to analyze the effect of topography on its current and future functioning, we have carried out a space for time substitution study along a gradient that reflects climate changes predicted by the IPCC for this region. The analysis of relationship between the Normalized Vegetation Index (NDVI) and topographic variables related that evapotranspiration and water accumulation exert an important effect on *M. tennnacissima* coverage and biomass, which showed a clear seasonality controlled by the previous state of the vegetation and aridity. Topography also plays a crucial role on *M. tennacissima* performance by controlling spatial variations of NDVI, which showed higher values in the areas of water accumulation. Finally, we showed that according our model predictions *M. tennacissima* NDVI values will be reduced by the end of the century. However, this effect will be cushioned in areas of runoff water accumulation, leading to changes in vegetation distribution patters that may lead to a new eco-hydrological balance.

KEY WORDS:

Macrochloa tenacissima L., water redistribution, NDVI, climate change, mediterranean semi-arid ecosystems, topography, spatial distribution

1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

Los ecosistemas áridos y semiáridos, también conocidos como “Drylands”, son el bioma más extenso del planeta y se espera que su extensión aumente hasta llegar a cubrir un 50% antes de final de siglo (Huang *et al.*, 2015). Caracterizados por presentar unas precipitaciones escasas y elevadas temperaturas, estos ecosistemas son especialmente sensibles al cambio climático y a los procesos de degradación derivados de la fuerte presión antrópica a la que se encuentran sometidos (Reynolds *et al.*, 2007). Además, los modelos de cambio climático predicen un aumento de la temperatura generalizado en estos ecosistemas, con periodos de sequía más frecuentes y de mayor duración (IPCC, 2013). Este aumento de la aridez limitará la disponibilidad de agua, con efectos negativos sobre la productividad primaria, la cobertura vegetal y su capacidad para proveer bienes y servicios básicos a la sociedad, amenazando de esta forma a la calidad de vida de 2.000 millones de personas (Safriel *et al.*, 2005).

Las estepas de *Macrochloa tenacissima* L. o “espartales” son uno de los ecosistemas semiáridos más importantes de la región Mediterránea (Ramírez *et al.*, 2007). El esparto es un arbusto perenne que se extiende de forma natural por el Noroeste de África y la Península Ibérica, ocupando más de 80.000 Km² (Maestre *et al.*, 2007). Este arbusto presenta una serie de adaptaciones morfológicas y fisiológicas que le permiten sobrevivir en condiciones de aridez, elevada insolación y sustratos poco desarrollados (Maestre *et al.*, 2007; Ramírez *et al.*, 2007). Sin embargo, al igual que ocurre en la mayoría de ecosistemas áridos y semiáridos, las duras condiciones ambientales limitan su crecimiento y su productividad, dando lugar a paisajes abiertos donde la cobertura vegetal es dispersa y se agrupa formando manchas o parches dentro de una matriz heterogénea de suelo desnudo (Puigdefabregas, 2005). Estas manchas o parches de vegetación, actúan como islas de fertilidad, en las que el aporte extra de materia orgánica por parte de la vegetación aumenta la estabilidad del suelo, su porosidad y su capacidad de retención de agua (Maestre *et al.*, 2007; Pugnaire, *et al.*, 2011). El efecto positivo de la vegetación sobre las propiedades del suelo, combinado con el efecto directo de las raíces y el dosel vegetal en la infiltración y en la evaporación aumenta la disponibilidad de agua en comparación con las zonas abiertas (Thompson *et al.*, 2011) y da lugar a un sistema complejo, desde el punto de vista eco-hidrológico, en el que durante los escasos eventos de lluvia la escorrentía que se genera en los espacios

abiertos, frecuentemente encostrados (áreas fuente de escorrentía), se redistribuye hacia parches de vegetación, donde se infiltra (sumideros de escorrentía) (Assouline *et al.*, 2015; Chen *et al.*, 2016; Ludwig *et al.*, 2005; Mayor *et al.*, 2008; Puigdefabregas *et al.*, 1999; Rodríguez-Caballero *et al.*, 2014; Thompson *et al.*, 2011). El aporte extra de agua y nutrientes desde los claros hacia los parches de vegetación genera pulsos de crecimiento de la vegetación mayores del que cabría esperar según el régimen de precipitaciones que aumentan la capacidad de la vegetación de retener agua y nutrientes provenientes de los claros entre plantas durante los siguientes eventos de lluvia (Ludwig *et al.*, 2005).

Esta compleja interacción fuente-sumidero que minimiza las pérdidas de agua y nutrientes a través de la escorrentía a la vez que maximiza la cantidad de recursos disponibles para la vegetación, condiciona la distribución espacial de la vegetación (Chen *et al.*, 2013; Chen *et al.*, 2016; Magliano *et al.*, 2015) y da lugar a diferentes patrones espaciales, como los Tigerbush (Lefever & Lejeune, 1997), fairy circles (Bonachela *et al.*, 2015) o la vegetación en manchas. La ocurrencia de una u otra forma de distribución espacial en un determinado ecosistema, está controlada por las necesidades hídricas de la vegetación (Bonachela *et al.*, 2015) y por el efecto de los diferentes factores abióticos que modifican la redistribución de agua y nutrientes (Greig-Smith, 1979; Monger & Bestelmeyer, 2006; Peters & Havstad 2006).

En los procesos de redistribución del agua generada entre los claros de vegetación, la topografía es uno de los factores que juega un papel clave (Hwang *et al.*, 2012). La pendiente del terreno o la orientación son factores que condicionan la entrada, redistribución y salida de agua del ecosistema mediante multitud de procesos (Thompson *et al.*, 2011), controlando las dinámicas fuente-sumidero y dando lugar a la aparición de especies o densidades vegetales que requieren aportes hídricos mayores a los que la propia precipitación puede aportar (Buis & Veldkamp, 2008). Además, las interacciones entre topografía y vegetación, a través de la redistribución de agua, podrían amortiguar las fuertes recesiones que se predicen para los espartales Mediterráneos como consecuencia de cambio climático (Louhaichi *et al.*, 2016 ; Ben-Mariem & Chaieb, 2017).

Sin embargo, no se dispone de mucha información en este sentido. El principal problema que podría justificar esta falta de información es el hecho de que los estudios

de campo suelen ser costosos y puntuales por lo que no incluyen interacciones espaciales dentro de un mismo ecosistema. Por este motivo, deben emplearse otras metodologías que permitan el estudio de las dinámicas fuente-sumidero a grandes escalas espaciotemporales. El empleo de sistemas de información geográfica y teledetección permite abordar de forma asumible estos procesos mediante el empleo de series históricas de imágenes de satélite de media resolución e índices espectrales derivados de estas, como el del índice de vegetación normalizado (NDVI de sus siglas en inglés "Normalized Difference Vegetation Index"; Rouse *et al.*, 1974). Por ejemplo, los compuestos de NDVI obtenidos a partir de las imágenes MODIS, con una resolución temporal entre 16-30 días han sido ampliamente utilizados para monitorizar el estado, cobertura y respuesta de la vegetación ante variaciones en la disponibilidad de recursos en diferentes ecosistemas a lo largo de todo el mundo (Bian & Walsh, 1993; Huber *et al.*, 2011; Hwang *et al.*, 2012). Sin embargo, debido a la falta de resolución espacial que presentan las imágenes MODIS, con tamaños de pixel que muchas veces exceden la longitud de las laderas (250 x 250m), no existen trabajos que relacionen esta respuesta con la topografía. Con la aparición de las imágenes SENTINEL-2, que presentan una muy buena resolución espacial (10 x 10 m), se abre un nuevo horizonte de aplicaciones futuras en este sentido, aunque las series temporales existentes hoy día son aún muy cortas, lo cual limita su aplicación en estudios relacionados con la respuesta de la vegetación al cambio climático. Esta limitación puede solventarse mediante la sustitución de espacio por tiempo (SFT de su designación en inglés "Space-For-Time"). Este tipo de diseño experimental, en el que la componente espacial a lo largo de un gradiente climático sustituye a la componente temporal, permite suplir la falta de series históricas, y nos ofrece la posibilidad de utilizar las imágenes SENTINEL-2 para investigar la respuesta de la vegetación a las condiciones climáticas previstas por los modelos de cambio climático. Este método se ha aplicado con frecuencia para analizar la sucesión vegetal y modelizar los efectos del cambio climático sobre la biodiversidad (Blois *et al.*, 2013).

Para poder predecir la respuesta de los espartales a los cambios de precipitación y temperatura que se prevén para la región mediterránea como consecuencia del cambio climático, debe considerarse no sólo la respuesta de la vegetación a cambios en el régimen de precipitaciones, sino también, el papel que juegan los espacios entre plantas vasculares en la generación de escorrentía y la redistribución de agua y nutrientes, y

como este se verá afectado por el aumento de aridez y la actividad antrópica. Solo de esta forma seremos capaces de desarrollar planes de gestión y estrategias de restauración eficientes que nos ayuden a prevenir y mitigar los impactos del cambio climático, sobre las funciones y servicios de los espartales mediterráneos. Por este motivo nos planteamos los siguientes objetivos:

- i) estudiar la respuesta y dinámica de los espartales mediterráneos del SE de la península Ibérica frente a cambios de precipitación y evapotranspiración, que condicionan la disponibilidad de agua
- ii) analizar el efecto que ejerce la topografía, a través de su control sobre la evapotranspiración potencial y la redistribución de agua, en el funcionamiento de estos ecosistemas
- iii) predecir la respuesta de los espartales mediterráneos a la disminución de precipitación y el aumento de temperatura que se prevé ocurra en esta zona como consecuencia del cambio climático y cuantificar el efecto que la topografía jugará en esta respuesta

Para la consecución de los objetivos se analizará a través de un estudio de sustitución de espacio por tiempo el funcionamiento de 17 zonas de estudio situadas en un gradiente de aridez espacial que refleja los cambios predichos por el IPCC para esta región.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1 Selección de las zonas de estudio:

El trabajo se ha desarrollado en el SE de la península Ibérica a lo largo de un gradiente de aridez situado entre las provincias de Alicante y Murcia (Figura 1). Este gradiente representa los cambios de temperatura y precipitación esperados para la región mediterránea según el 5º informe del IPCC (IPCC, 2014). A través de una revisión bibliográfica se identificaron 17 zonas localizadas en diferentes posiciones a lo largo del gradiente de aridez, todas ellas dominadas por esparto (*Macrochloa tenacissima* L.) desarrollados sobre calcisoles líticos de textura franco-limosa, derivados de litologías margosas y calizas (Maestre, 2002; Maestre, 2004; Maestre & Cortina, 2004).

EFFECTO DEL CAMBIO GLOBAL EN LOS ESPARTALES DEL SE IBÉRICO: IMPORTANCIA DEL EFECTO DE LA TOPOGRAFIA EN LA DISPONIBILIDAD DE AGUA

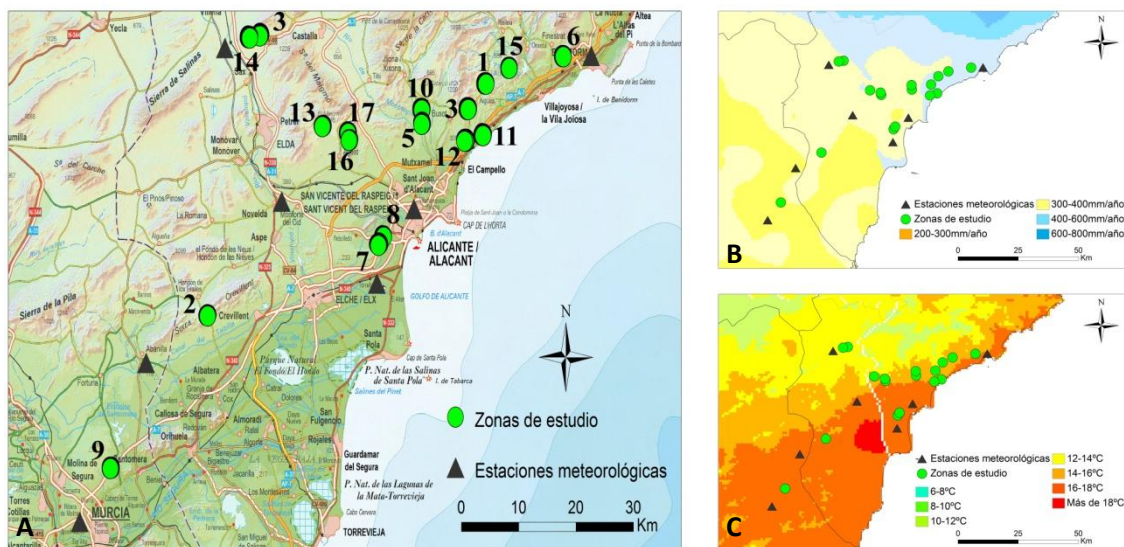


Figura 1. Localización de las 17 áreas de estudio (A) a lo largo del gradiente de precipitación (B) y temperatura (C) que caracteriza el SE de la península ibérica. En gris se ilustran las estaciones meteorológicas empleadas para la caracterización del año hidrológico 2016/2017.

En cada una de las 17 zonas se delimitó una parcela de estudio con un área mínima de 2 Ha, compuesta principalmente por vegetación natural. La delimitación espacial de las parcelas se realizó mediante la digitalización con ArcMap 10.1 ESRI utilizando como base las ortoimágenes del Plan Nacional de Ortofotografía Aérea (PNOA) de máxima actualidad (Agosto de 2017 para la provincia de Murcia y Mayo de 2015 para la provincia de Alicante) obtenidas a través de la web del Instituto Geográfico Nacional (IGN) con un tamaño de pixel de 0.25 metros (hojas 0846, 0847, 0848, 0871, 0872, 0892, 0913).

2.2 Caracterización climática:

Para la caracterización climática general de cada una de las zonas de estudio se ha empleado la información de precipitación media anual para el periodo 1971-2000 y los promedios anuales de temperatura media diaria, temperatura máxima diaria y temperatura mínima diaria recogidos en el Atlas Climático Español de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMet; <http://agroclimap.aemet.es>). Además, se obtuvo información mensual detallada de precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima y temperatura media diarias para el año hidrológico 2016/2017 (01/10/2016-30/09/2017). Para ello se identificaron las estaciones meteorológicas de la red AEMet más próximas a cada una de las parcelas (Figura 1, Tablas S1 y S2), encontrándose todas ellas a menos de 30 Km de distancia.

Finalmente, para examinar los efectos del cambio climático en la región mediterránea e intentar predecir su efecto sobre el funcionamiento de los espartales, analizamos las predicciones de temperatura y precipitación diaria para el periodo 2010-2100 dentro de un área de 2.5 x 2.5 ° que incluye las 17 parcelas de estudio. Nos centramos en los resultados obtenidos por el modelo de circulación climática MPI-ESM (Giorgetta *et al.*, 2013) para dos de los cuatro RCPs (de su definición en inglés "Representative Concentration Pathways") definidos en el Quinto Informe de Evaluación del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, 2014): RCP2.6 y RCP8.5. Los RCP son escenarios que reúnen un conjunto de actuaciones y decisiones socioeconómicas que condicionan las emisiones de gases de efecto invernadero (GEIs) diseñados para respaldar la investigación sobre los impactos y posibles respuestas políticas al cambio climático (Moss *et al.*, 2010; Van vuuren & Riahi, 2011).

Los datos fueron obtenidos del centro mundial de datos climáticos (World Data Center for Climate; WDC; <https://www.dkrz.de/daten/wdcc>).

2.3 Índices topográficos: redistribución potencial de agua y radiación solar

A partir del Modelo Digital de Elevaciones (MDE) obtenido del Instituto Geográfico Nacional (IGN) con un tamaño de pixel de 5m de resolución, proyección UTM y sistema de referencia ETRS89 (hojas 0846, 0847, 0848, 0871, 0872, 0892, 0913) se calculó el índice topográfico de acumulación de agua, previa corrección del MDE para evitar sumideros fruto de la interpolación matemática, (TWI de su designación en inglés "Topografic Wetnex Index"; Beven & Kirby, 1979) y la radiación solar potencial, considerando el efecto de las sombras producidas por la topografía. El TWI, que viene definido por la ecuación 1, refleja la redistribución y acumulación potencial de agua como consecuencia de la topografía (Moore *et al.*, 1988):

$$TWI = Ln(\frac{A}{tan\beta}) \quad (1)$$

donde TWI es el índice topográfico de acumulación de agua (adimensional), A es el área de contribución potencial en metros cuadrados y β la pendiente del terreno en radianes.

La radiación solar potencial máxima anual y mensual de cada pixel se calculó aplicando el algoritmo de cuenca visual hemisférica desarrollado por Fu (1990) y Rich *et al.*,

(1994) y posteriormente ampliado por Fu y Rich (2000, 2002). Este índice topográfico incluye el efecto de las sombras originadas por el relieve, efecto que no se encuentra recogido en la información climática obtenida a partir de estaciones meteorológicas convencionales y que juega un papel fundamental en el control de la evapotranspiración potencial (Monteith & Szeicz, 1962).

A partir de los datos de temperatura y precipitación obtenidos para la caracterización climática de las diferentes zonas de estudio y la radiación máxima potencial de cada pixel considerando el efecto de las sombras, se calculó la evapotranspiración potencial (ETP) mediante la expresión propuesta por Hargreaves y Allen (2003; ecuación 2):

$$ETP = 0.023 * Ra * (T_{med} + 17.8) * (T_{max} - T_{min})^{0.50} \quad (2)$$

donde ETP es la evapotranspiración potencial (mm), Ra es la radiación solar incidente (mm), T max es la temperatura máxima (°C), T med es la temperatura media (°C) y T min es la temperatura mínima (°C).

Conocido el valor de ETP y la precipitación para cada pixel se calculó el índice de aridez de acuerdo con la definición propuesta por Naciones Unidas (UNEP, 1997; ecuación 3):

$$Aridez = \left(\frac{ETP}{P} \right) \quad (3)$$

donde ETP es la evapotranspiración potencial (mm) y P es la precipitación (mm).

Tanto la ETP como la aridez se determinaron a escala anual a partir de los datos promedio de 30 años recogidos en el Atlas Climático Español de la AEMet como para cada uno de los meses del periodo estudiado (año hidrológico 2016/2017).

2.4 Caracterización de la vegetación: cobertura y respuesta espectral

Para identificar los parches de vegetación y suelo desnudo y poder así cuantificar la cobertura total de vegetación en cada una de las parcelas de estudio, se realizó una clasificación supervisada mediante el algoritmo de aprendizaje estadístico no paramétrico SVM (de sus siglas en inglés "Support Vector Machine"). Este tipo de algoritmos permite la reclasificación de imágenes de satélite a partir de puntos de entrenamiento establecidos por el usuario (Shi, 2014; Ustuner *et al.*, 2015). Para ello se emplearon las ortoimágenes del PNOA. En cada una de las parcelas de estudio, se

identificaron un mínimo de 350 puntos para cada una de las dos clases contempladas: vegetación y suelo desnudo (300 puntos para entrenamiento y los puntos restantes para la validación de la clasificación obtenida). La selección de los puntos de entrenamiento, la clasificación y la validación de cada una de las parcelas se realizaron mediante el software de tratamiento de imágenes ENVI 4.7[®] (ITT, 2009), descartando cualquier clasificación con una precisión menor del 90%.

El funcionamiento de la vegetación se describe usando el índice de vegetación NDVI (ecuación 4), calculado a partir de la serie histórica de imágenes obtenidas por el satélite europeo SENTINEL-2 para el año hidrológico estudiado 2016/2017:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{RED}}{\rho_{NIR} + \rho_{RED}} \quad (4)$$

donde NDVI representa el índice de vegetación normalizado, ρ_{NIR} representa la reflectancia en el infrarrojo cercano (770-900 nm) y ρ_{RED} representa la reflectancia en la región roja del espectro electromagnético (630-690 nm).

El NDVI es un índice adimensional que refleja el estado de la vegetación, asumiendo que la clorofila es un pigmento fotosintético muy absorbente en la franja de luz roja mientras que la estructura externa de las hojas suele reflejar fuertemente en el infrarrojo cercano (Esau *et al.*, 2016). Obtenido el NDVI para cada una de las 132 imágenes SENTINEL-2 recogidas durante el periodo de estudio, se realizó un compuesto por mes con el valor máximo de NDVI de cada pixel. Esta metodología produce como resultado 12 imágenes o compuestos mensuales que minimizan el efecto de las nubes y permiten caracterizar la dinámica anual de cada uno de los pixeles. Sin embargo, en el periodo de estudio analizado, todas las imágenes de SENTINEL-2 para los meses de Diciembre y Abril presentaron nubes sobre nuestras parcelas, por lo que estos meses fueron excluidos de los análisis.

2.5 Análisis de los datos y proyecciones climáticas

Como los valores de TWI y ETP se extrajeron a partir del MDE de 5m de resolución, el primer paso para homogeneizar las diferentes bases de datos fue resamplear la resolución espacial de estas dos variables en de cada una de las 17 parcelas a una resolución de 10m, coincidiendo con la resolución espacial de las imágenes SENTINEL-2 . Para ello, se calculó el valor promedio de TWI y ETP dentro de cada

pixel de las imágenes SENTINEL-2 y se extrajeron los valores mensuales de NDVI, radiación solar y ETP y el valor de TWI de cada pixel. A partir de los datos mensuales se estimó el NDVI promedio, máximo y mínimo, la radiación solar y la ETP de cada pixel para todo año hidrológico 2016/2017.

Posteriormente, con de la información mensual mencionada de cada uno de los 9920 pixeles que conforman las 17 parcelas de estudio, se exploraron las relaciones entre las variables topográficas a través del TWI, la ETP calculada mediante la radiación solar potencial considerando el efecto de las sombras y la respuesta de la vegetación a través de la información contenida en el NDVI. Para ello se ajustó un modelo lineal generalizado (GLM) en el que se incluyó el TWI, la aridez y el NDVI del mes anterior al mes de análisis ($NDVI_{n-1}$). De esta forma asumimos que la respuesta de la vegetación en cada pixel de estudio estará condicionada por el estado previo de la vegetación ($NDVI_{n-1}$), la aridez (balance entre precipitación y ETP considerando el efecto de las sombras topográficas) y su posición a lo largo de la ladera (zonas de mayor o menor acumulación de agua). El efecto individual de cada uno de estos factores a su vez se verá afectado por cada uno de los otros factores (por ejemplo, esperamos que el efecto del TWI sea más importante a medida que aumenta la aridez), para lo cual incluimos las interacciones entre los diferentes factores ($NDVI_n$ / aridez y $NDVI_n$ / TWI) en el análisis. Todos los análisis estadísticos fueron realizados en Statistica 7 y R version 3.0.

Aunque, debido a la limitación de datos SENTINEL-2, estos resultados representan la dinámica de cada una de las zonas de estudio durante un solo año hidrológico, las 17 parcelas están situadas a lo largo de todo el gradiente de aridez que caracteriza a las zonas semiáridas (0.23-0.47 vs 0.20-0.50; UNEP 1997). Esto nos permite analizar las diferencias entre zonas de estudio como un estudio de sustitución espacio por tiempo en el que las diferencias de precipitación y temperatura entre parcelas representan el aumento de aridez que se espera ocurra en la región mediterránea como consecuencia del cambio climático. Por lo que finalmente, analizamos cualquier posible tendencia en las predicciones de temperatura y precipitación para la zona de estudio obtenidas del modelo de circulación climática descrito en la sección (2.2), mediante el test de tendencia Man-Kendall y el estadístico tau (Hirsch & Slack, 1984). A partir de estas predicciones y de la ecuación obtenida del GLM, estimamos como el NDVI mensual de áreas con diferentes valores de TWI responderán a estos cambios de temperatura y precipitación que se espera ocurran en la región Mediterránea.

3. RESULTADOS

3.1 Caracterización climática

La información climática obtenida del Atlas Climático Español de la Agencia Estatal de Meteorología revela que las 17 parcelas seleccionadas se sitúan a lo largo de un gradiente de aridez con valores de precipitación media anual que varían entre 292 mm (Foncalent 1) hasta 460 mm (Marquesa). De forma similar, la temperatura media anual oscila entre los 18°C en las zonas más al sur y los 14°C en las parcelas de mayor altitud y alejadas de la costa (Figura 1; Anexo1, Tabla S1).

Como consecuencia de la diferencia de temperatura y precipitación, el índice de aridez entre parcelas varía entre 0.27 en Fortuna y 0.46 en La Nuza, coincidiendo las parcelas más áridas con aquellas con menor precipitación anual media (Figura 2).

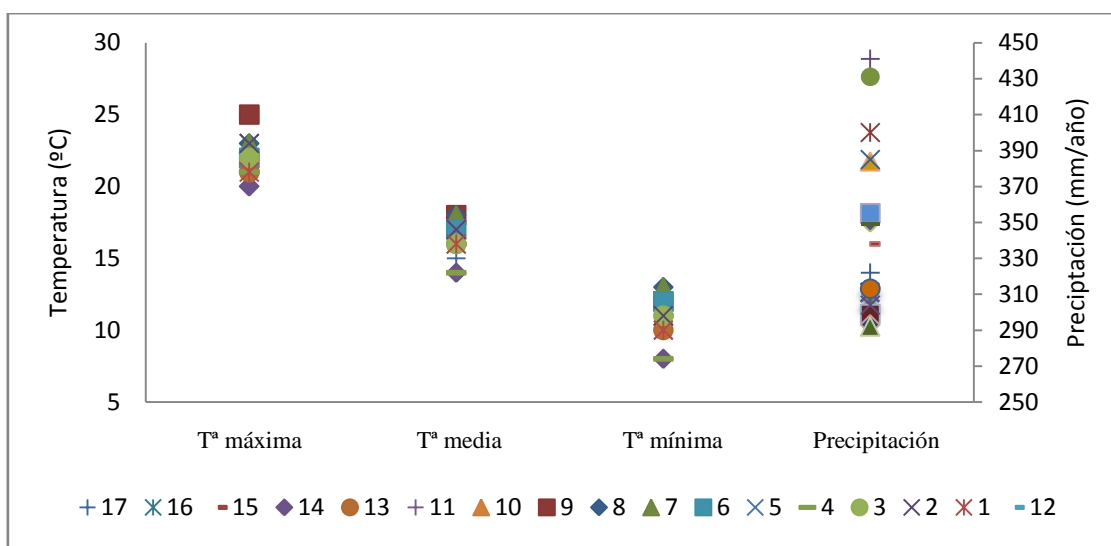


Figura 2. Valores de temperatura máxima, media y mínima y precipitación anual para cada una de las parcelas de estudio. Los datos representan valores anuales promedio para el periodo 1971-2000.

Para el año hidrológico analizado se observan valores de precipitación superiores a la media en la mayoría de las parcelas (Anexo1, Tabla S2). Durante los meses estivales apenas se recogen precipitaciones, registrándose estas principalmente en invierno y primavera, con los principales eventos en los meses de Enero, Marzo y Diciembre (Figura 3a). Los valores de temperatura registrados durante el periodo de estudio también fueron ligeramente superiores a la media, aunque esta diferencia no es tan acusada como en el caso de las precipitaciones (Anexo1, Tabla S2). La temperatura

media anual oscila entre 20°C y 15°C, registrándose el mismo patrón en todas las parcelas con los valores máximos en los meses de verano (Figura 3b).

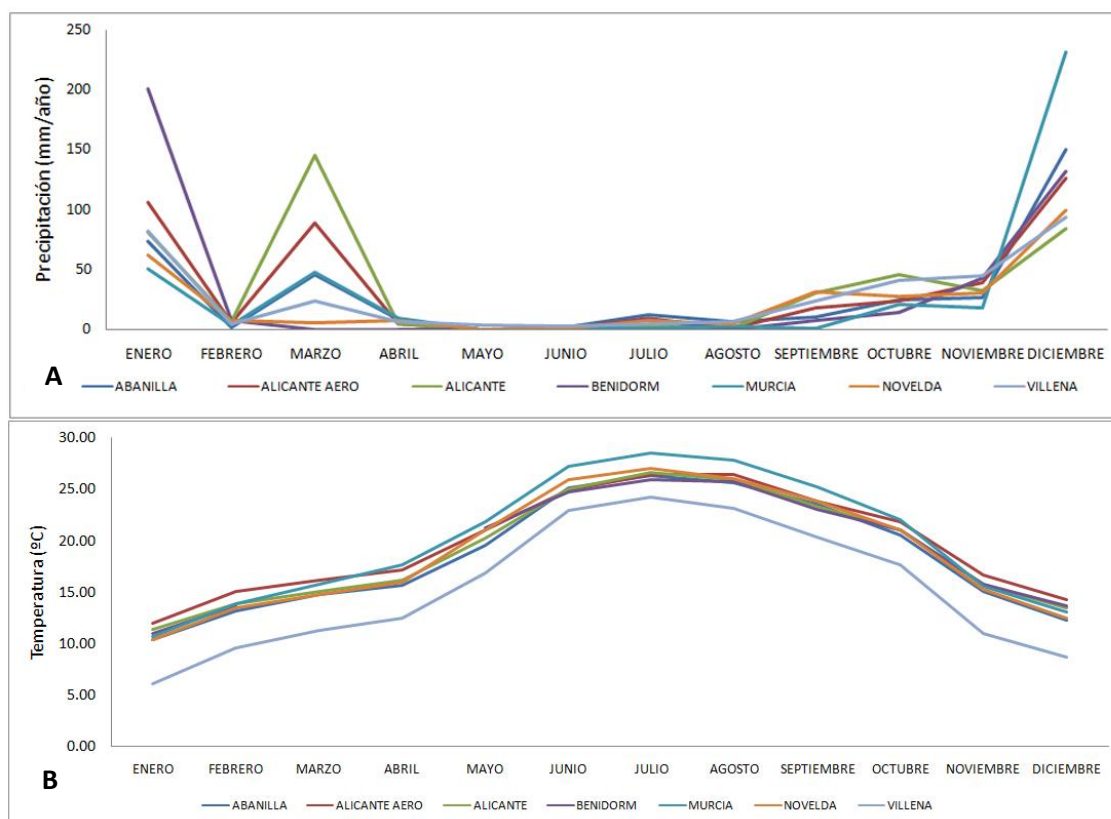


Figura 3. Precipitación (A) y temperatura media mensual medida (B) durante el año hidrológico 2016/2017 en la estación más próxima a cada una de las zonas de estudio.

3.2 Atributos topográficos

El análisis topográfico de las diferentes parcelas de estudio revela valores de TWI promedio similares en todas las parcelas, que oscilan entre 4.0 y 5.2 (Figura 4). Sin embargo existe una elevada variabilidad dentro de cada una de las parcelas, con valores que oscilan entre 1.3 y 11.4. Cuando analizamos la distribución espacial de este índice en las diferentes zonas de estudio podemos observar un patrón similar, con valores elevados en las zonas de acumulación de escorrentía, como pequeñas vaguadas y flujos preferentes, y en las partes bajas de las laderas con baja pendiente y un área de contribución relativamente elevada. Las partes altas de las laderas y las divisorias, por el contrario, presentaron los valores más bajos de TWI, debido a la reducida área de contribución potencial (Anexo 2, Figura S1).

La radiación solar potencial máxima considerando el efecto de las sombras producidas por la topografía presentó mayores variaciones entre las diferentes parcelas que el TWI, como resultado de las diferencias en orientación y topografía entre las diferentes parcelas de estudio, oscilando sus valores entre 3.095.060WH/m² y 2.049.640 WH/m² anuales (Figura 4; Anexo 2, Figura S1).

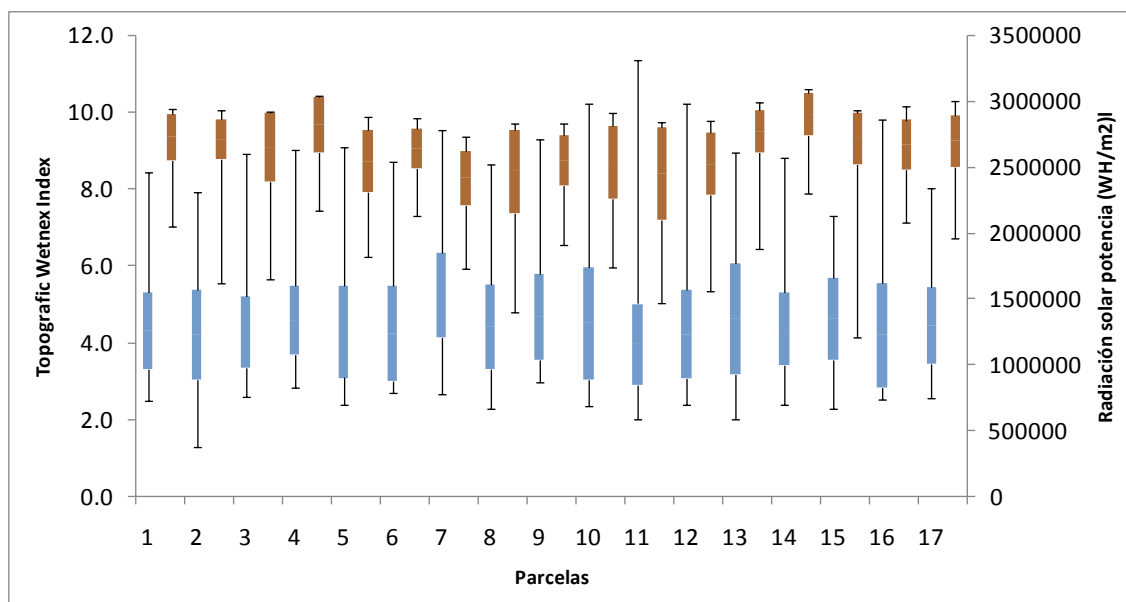


Figura 4. Media \pm desviación estándar (cajas) y valores máximos y mínimos (bigotes) de los valores de TWI (azul, adimensional) y máxima radiación solar potencial (marrón, WH/m²) a lo largo del gradiente de aridez evaluado.

3.3 Cobertura vegetal y NDVI

Los valores promedio de vegetación de las diferentes parcelas oscilaron entre un 23% hasta un 69% (45% de cobertura promedio en todas las parcelas). El NDVI promedio anual presento un patrón similar con valores que oscilaron entre 0.14 en las parcelas con menor cobertura vegetal (Jijona y Etasa) hasta valores cercanos a 0.32 en las parcelas con mayor cobertura (Peñarrubia), existiendo una relación linear entre ambas variables ($r^2 = 0.65$; $p < 0.05$; Figura 5).

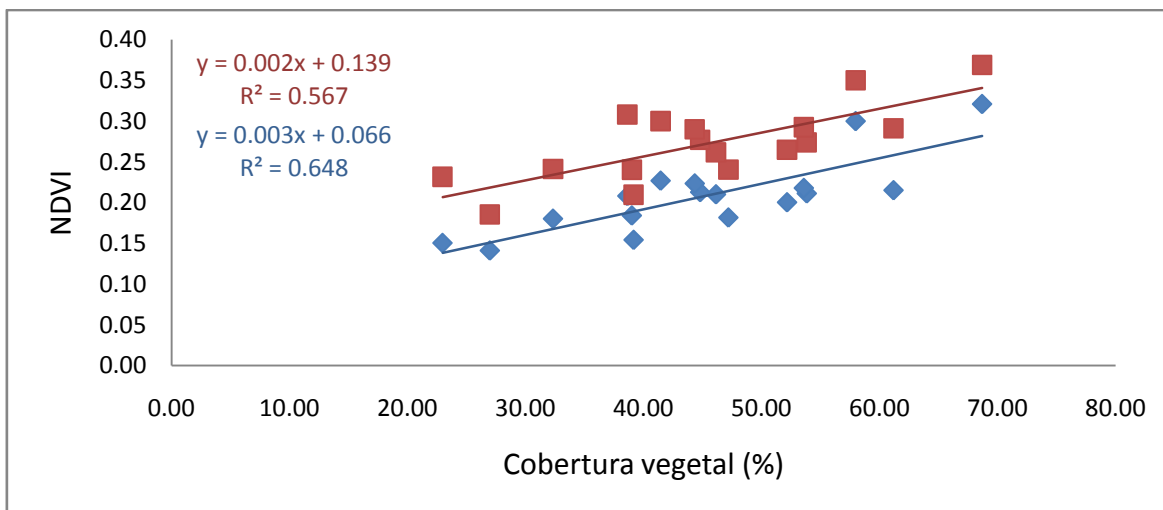


Figura 5. Relación entre cobertura de vegetación promedio obtenida a partir de la clasificación supervisada de las ortoimágenes de cada una de las parcelas y el NDVI promedio anual (azul) y máximo anual (rojo) obtenidos a partir de los compuestos SENTINEL-2.

Estos valores de NDVI promedio no son estáticos, si no que varían a lo largo del año, con un patrón similar en casi todas las parcelas. Los valores más bajos se registraron a principio del año hidrológico (Octubre 2016) y durante el periodo estival, al final del año hidrológico (Junio-Agosto 2017). Los picos máximos, por el contrario, coinciden con los meses de invierno y primavera (Figura 6), después de la época de lluvias en todas las parcelas (Anexo 2, Figura S1).

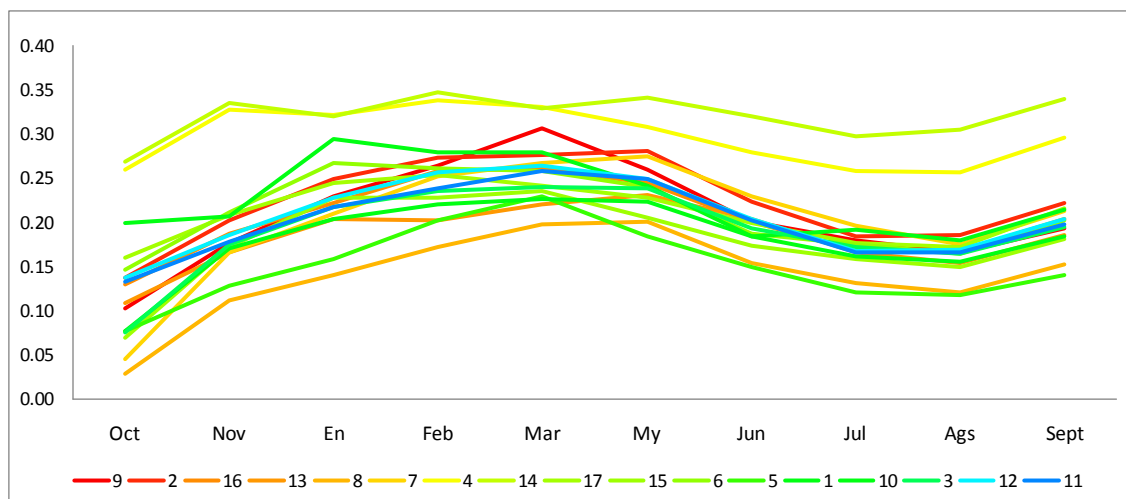


Figura 6. Dinámica anual del NDVI en cada una de las parcelas. Los números representan los códigos asignados a las parcelas (Anexo1, Tabla S3) mientras que los colores simbolizan el gradiente de aridez al que se ven sometidas (los tonos rojos indican menores valores del índice de aridez mientras que los tonos azulados indican valores altos).

Los valores más bajos de NDVI durante todo el periodo de estudio se dieron en las zonas de mayor aridez, aumentando estos a medida que disminuyó la aridez (valores

más elevados del índice de aridez). De hecho, las dos parcelas situadas en zonas intermedias dentro del gradiente de aridez (Colominas y Peñarrubia) presentaron una dinámica de NDVI diferente, con valores más constantes (en torno a 0.3) durante todo el periodo de estudio.

3.4 Efecto de la topografía en el funcionamiento de los espartales mediterráneos

Como podemos observar en la tabla 1, la dinámica estacional de la vegetación en cada una de las zonas de estudio y su variabilidad espacial, medidas a través de los cambios del NDVI de cada uno de los píxeles que componen las diferentes parcelas a lo largo del periodo de estudio, están controladas por el estado previo de la vegetación en cada uno de los píxeles ($NDVI_{n-1}$), por la aridez (que incluye el efecto de la variación estacional de la precipitación y la temperatura y el efecto de la topografía en el control de la radiación incidente) y por el efecto de la topografía en la redistribución de agua (TWI). Estos tres factores explican un 80% de la variación espacial y temporal del NDVI (Figura 7) en las 17 parcelas de estudio situadas a lo largo de nuestro gradiente climático, siendo el estado previo de la vegetación el factor más importante. Además la interacción entre todos los factores es significativa, lo cual indica que el efecto de cada uno de ellos está condicionado por los otros factores. Las relaciones entre el NDVI de un mes, el estado previo de la vegetación y los atributos topográficos queda descrita según la siguiente expresión ($r^2 = 0.81$, $p = 0.000$):

$$NDVI_n = 0.011 + 0.89 NDVI_{n-1} + 0.018 Aridez + 0.003 TWI + 0.16 NDVI_{n-1} * Aridez - 0.008 NDVI_{n-1} * TWI + 0.006 Aridez * TWI - 0.023 NDVI_{n-1} * Aridez * TWI \quad 5)$$

Tabla 1. Resumen del modelo lineal generalizado (GLM) para el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en función al estado previo de la vegetación ($NDVI_{n-1}$), los atributos topográficos de redistribución de agua y radiación solar contemplados (aridez, TWI) y las interacciones entre ellos.

Variables	SS	F	P	partial eta square
Intercept	0.037	33.57	0.00	0.0006
$NDVI_{n-1}$	11.271	10152.88	0.00	0.1514
Aridez	0.009	8.01	0.00	0.0001
TWI	0.042	37.61	0.00	0.0007
$NDVI_{n-1} \times Aridez$	0.040	35.62	0.00	0.0006
$NDVI_{n-1} \times TWI$	0.021	18.48	0.00	0.0003
$Aridez \times TWI$	0.0179	16.14	0.00	0.0003
$NDVI_{n-1} \times Aridez \times TWI$	0.0175	15.75	0.00	0.0003

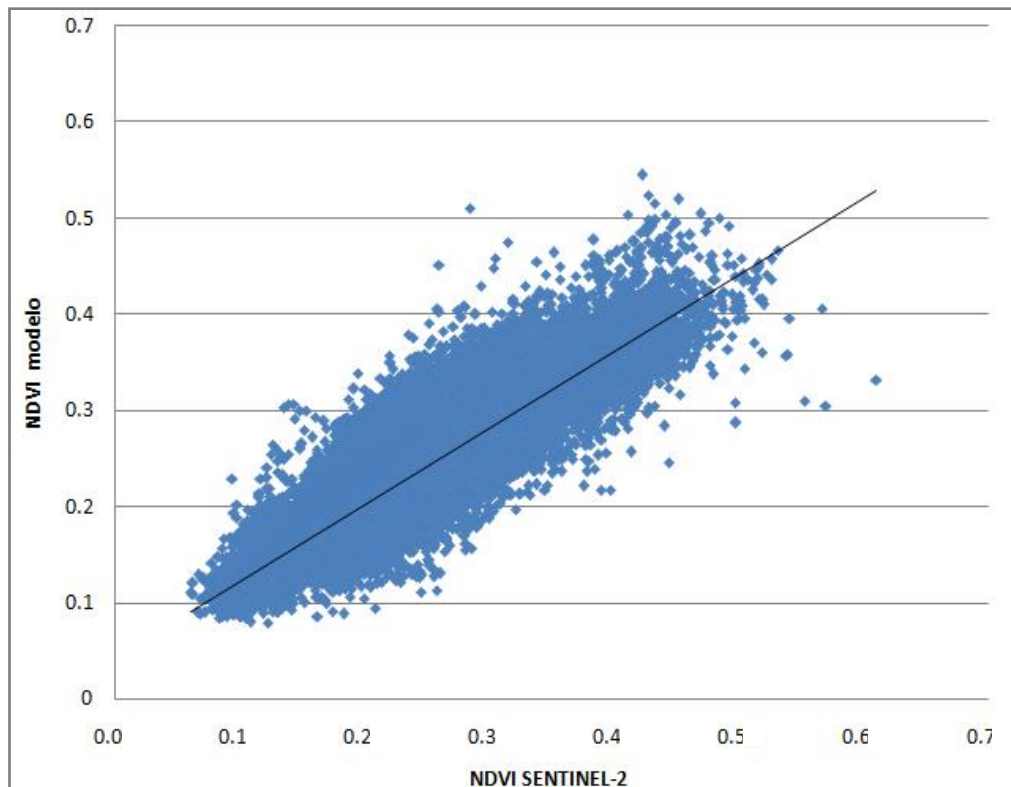


Figura 7. Relación entre el NDVI obtenido a partir de imágenes SENTINEL-2 y el NDVI estimado mediante la expresión resultante de los análisis (GLM).

3.5 Predicciones climáticas y modelos de simulación de la respuesta de los espartales frente al cambio climático

El modelo de circulación climática MPI-ESM predice un aumento significativo de la temperatura media, máxima y mínima de $+0.5^{\circ}\text{C}$ para finales de siglo en el RCP 2.6, sin que la precipitación muestre tendencias significativas (Figura 8a). En el RCP 8.5, los aumentos de temperatura son más patentes, $+3.7^{\circ}\text{C}$, observándose también una tendencia negativa en la precipitación anual, con una reducción de 1,17 mm/año, lo que implica una reducción de 117 mm de lluvia anual para 2010 (Figura 8b).

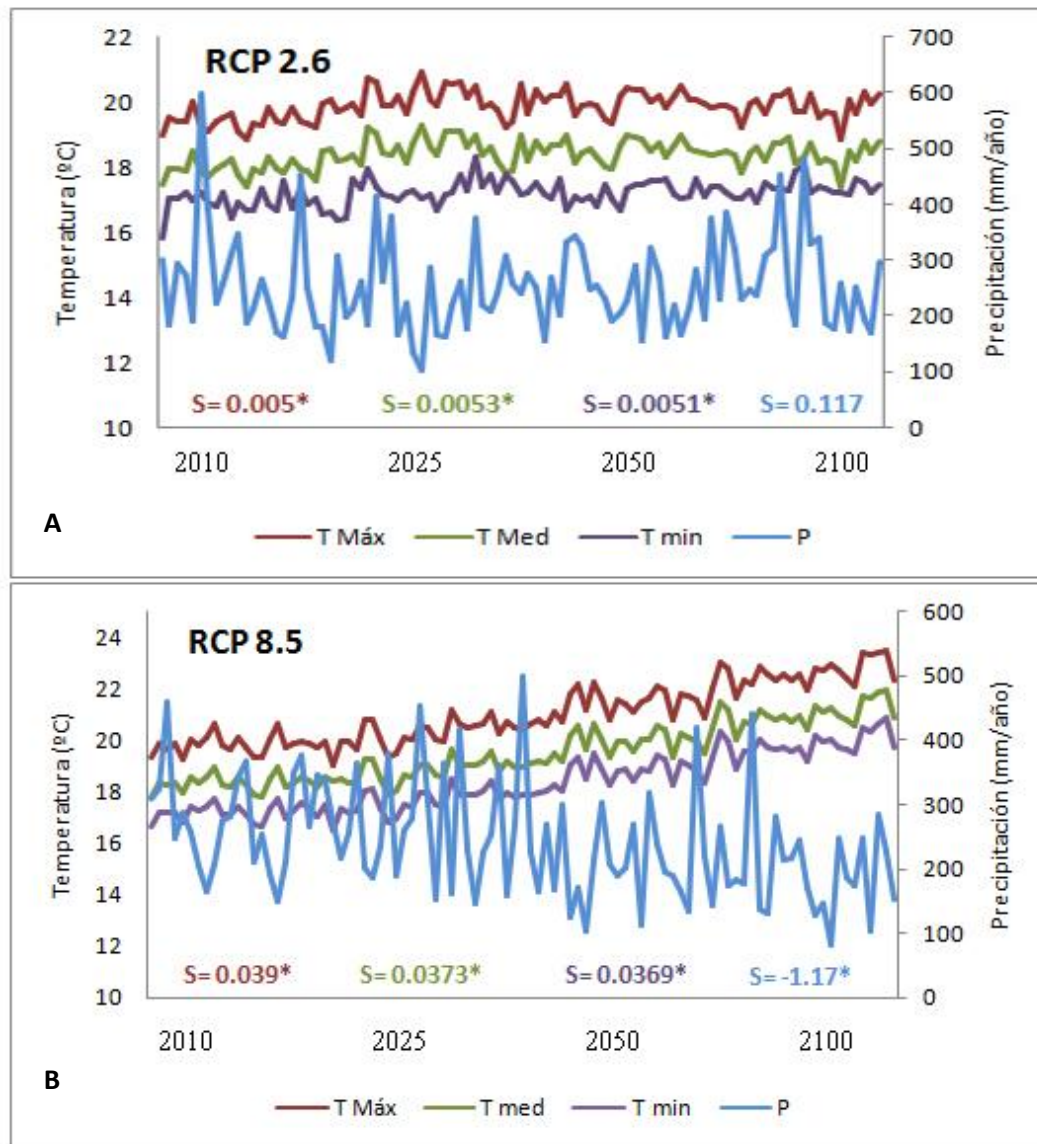


Figura 8. Valores de temperatura máxima (rojo), temperatura media (verde), temperatura mínima (morado), precipitación (azul) y valores de la pendiente de la recta de tendencia (S: Sens's slope) extraídos de las predicciones del modelo MPI-ESM sobre la zona de estudio para el RCP2.6 (A) y el RCP8.5 (B). Se señalan con * aquellos valores significativos ($p < 0.05$).

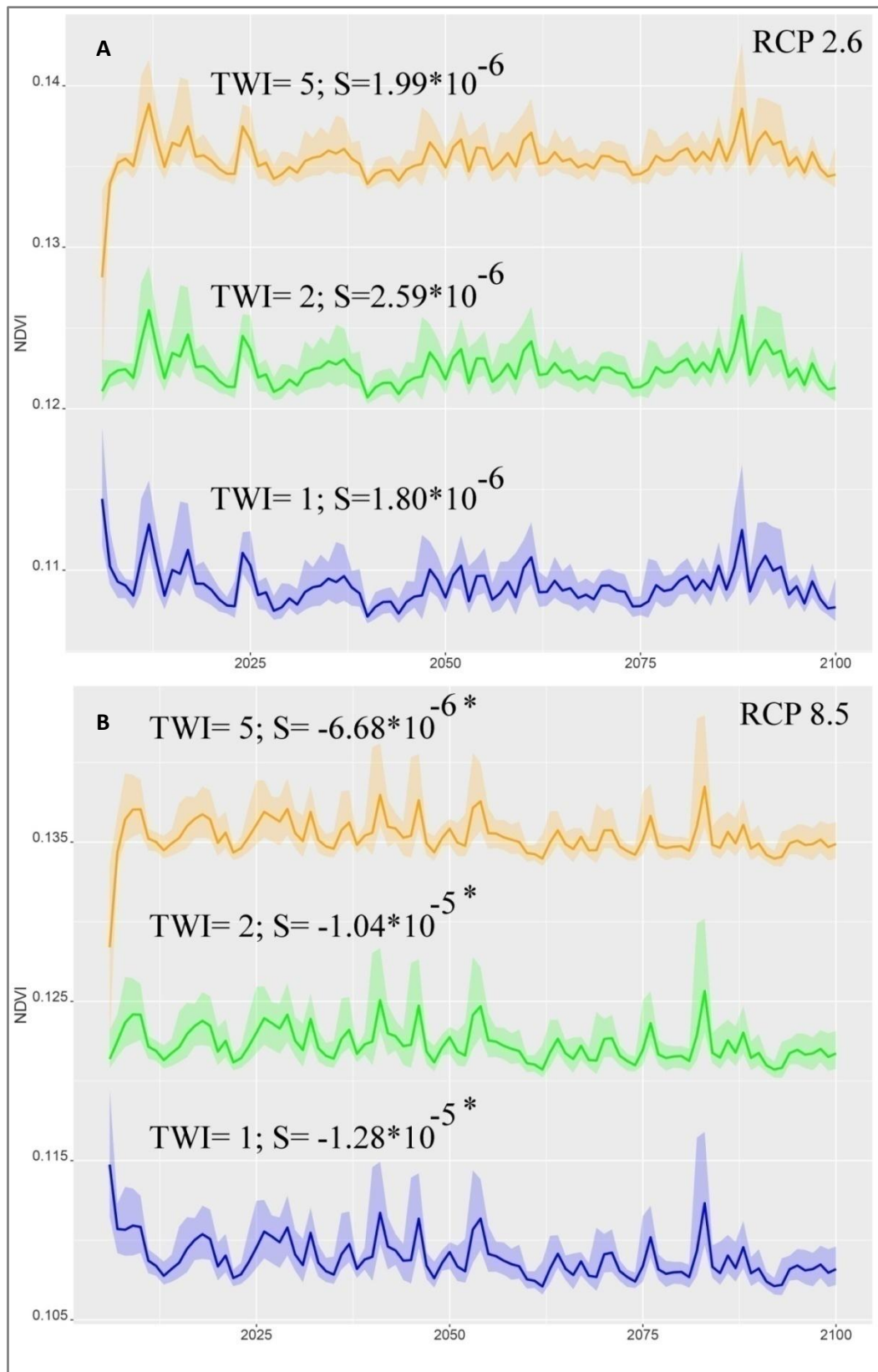


Figura 9. Respuesta estimada del NDVI a cambios al cambio climático (aridez) en función del posición espacial que ocupe la vegetación. Las zonas con mayor TWI soportan valores mayores de NDVI. En el RCP 2.6 el NDVI carece de tendencia temporal, mientras que en el RCP 8.5 tiende a disminuir significativamente sea cual sea el nivel de TWI soportado. Las cifras marcadas con asterisco (*) indican valores de tendencia significativos ($p < 0.05$).

Tras aplicar la ecuación 5 a las predicciones climáticas del IPCC, observamos como en el RCP 2.6 la tendencia de NDVI a lo largo del tiempo no es significativa ($p > 0.05$), estabilizándose a mayores valores de NDVI a medida que aumenta el valor del TWI (Figura 9a). En el RCP 8.5 (Figura 9b), donde la aridez aumenta de forma más drástica (Figura 8), observamos un patrón similar, con mayores valores de NDVI a medida que aumenta el TWI. Sin embargo, en este escenario, existe una tendencia significativa ($p < 0.05$) de disminución del NDVI como consecuencia del aumento de aridez. Además, como podemos observar en la figura 10, este efecto tiende a ser más importante, con valores de S más negativos, a medida que disminuyen los valores de TWI. Así, bajo este escenario, aquellas zonas donde el TWI es mayor muestran menor tendencia negativa, es decir, reducciones menos acusadas de NDVI que aquellas zonas donde el TWI es menor (Fig. 10).

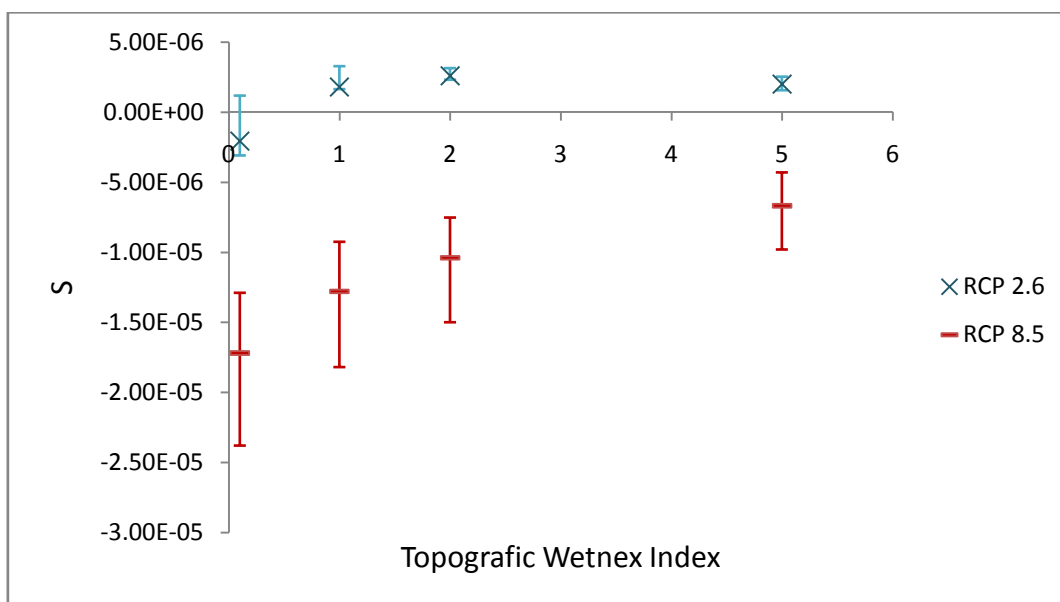


Figura 10. Relación entre la tendencia del NDVI (S) según los distintos escenarios y la redistribución potencial de agua. Se observa como para el RCP 8.5 aquellas posiciones con una menor acumulación potencial de agua disminuirán en mayor grado su NDVI.

4. DISCUSIÓN

El esparto es un matorral perenne que presenta una serie de adaptaciones fisiológicas y morfológicas que le permiten sobrevivir en ambientes extremos con largos periodos de sequía (Balaguer *et al.*, 2002; Farrant *et al.*, 1999; Pugnaire *et al.*, 1996; Valladares & Pugnaire, 1999). Por ejemplo, se ha descrito que esta especie es capaz de reducir los

contenidos de clorofila y agua en las hojas, y reducir su actividad fotosintética para minimizar el daño producido por la radiación solar durante los periodos de estrés hídrico, aumentando su productividad tras los eventos de lluvia (Pugnaire, 1996; Maestre *et al.*, 2004). Estos pulsos de agua, de frecuencia e intensidad irregular en el SE Ibérico, tienden a concentrarse en los meses de invierno, momento en el que el esparto alcanza su máxima actividad fotosintética (Ladrón de Guevara *et al.*, 2015). El aumento de la actividad fotosintética tras un periodo prolongado de condiciones hídricas favorables produce un incremento de la biomasa verde o biomasa fotosintéticamente activa, que depende de las condiciones previas de la vegetación y de la duración y magnitud de los pulsos de lluvia (López-Ballesteros *et al.*, 2018). Nuestros resultados, obtenidos del análisis detallado de la respuesta mensual de las 17 parcelas situadas a lo largo de un gradiente de aridez, corroboran este hecho. Como podemos ver en la tabla 1, la respuesta de los espartales semiáridos del SE Ibérico viene determinada por el estado previo de la vegetación ($NDVI_{n-1}$) y por la aridez. Esto da lugar a una clara estacionalidad en los valores de NDVI, con máximos entre Enero y Mayo ($NDVI = 0.31-0.29$) justo después de la época de lluvias (Figura 6; Anexo 2, Figura S1). La magnitud y el momento en el que se produce esta respuesta dependen principalmente del régimen de las precipitaciones y la temperatura, con un aumento del NDVI a media que disminuye la aridez de la zona de estudio (Tabla 1). Este patrón se repite en casi todas las zonas, salvo en Colominas y Peñarrubia, donde se observa una dinámica de NDVI diferente al resto, con los mayores valores de NDVI registrados en todas las parcelas y una baja estacionalidad. Esto se explica por la presencia de árboles del género *Pinus* en dichas zonas, que presentan respuesta espectrales más homogéneas a lo largo del año (Soudani *et al.*, 2012). Como podemos ver en la tabla 1, la topografía, también juega un papel fundamental en el funcionamiento de los espartales, a través de su control sobre la ETP y la redistribución de agua desde los espacios sin vegetación hasta los pies de planta. Este proceso da lugar a un aumento de los valores de NDVI en las zonas con menor insolación potencial y mayor acumulación de agua (Anexo 2, Figura S1). Además, como demuestra la interacción entre los tres factores (Tabla 1), este efecto varía en función de los valores de aridez y del estado previo de la vegetación, siendo más importante a medida que aumenta la aridez.

En general, la influencia que ejerce la topografía sobre el NDVI depende de la escala espacial de trabajo (Bian & Walsh, 1993; Muñoz & Kravchenko, 2012). En nuestro

caso, donde la vegetación es dispersa y posee un bajo porte y tamaño, el empleo de imágenes de muy alta resolución espacial, como las obtenidas a partir de vehículos aerotransportados no tripulados, puede ayudar a paliar los problemas de escala, aunque estos son costosos. A su vez, el TWI es un índice de redistribución de agua desarrollado para su aplicación a escala de cuenca. Como este índice no incluye el efecto de re-infiltración de la escorrentía en la vegetación, esto puede dar lugar a algunas incongruencias cuando se aplica a escalas más detalladas como las que se utilizan en este trabajo. Para la resolución SENTIEL-2, dada el escaso diámetro de los pies de esparto y la distancia entre plantas, pueden existir interferencias que impidan conocer con exactitud las relaciones entre topografía y vegetación mediante el TWI. Otro indicador más específico que podría ser empleado a pequeña escala es el SWC (de sus siglas en inglés Soil Water Content) obtenido a partir de modelos hidrológicos sencillos, que contempla el efecto de la vegetación en la infiltración. Sin embargo requiere una serie de variables relacionadas con las propiedades del suelo que dificultan su aplicación.

Los modelos de cambio climático predicen un aumento de la temperatura y una disminución de la precipitación en la región mediterránea durante los próximos años (Giorgi & Lionello, 2008). Estos cambios son especialmente evidentes en escenario menos conservador (RCP85; Bussines as usual; IPCC, 2014), y darán lugar a una disminución de la precipitación, comparado con los valores actuales de (-117mm) y un aumento de la temperatura de +3.7°C similares a los observados a lo largo de nuestro gradiente de muestreo (Figura 8). Por lo tanto, si consideramos los resultados obtenidos en las 17 parcelas situadas a lo largo de todo el gradiente de aridez como un estudio de sustitución espacio por tiempo que refleja los cambios climáticos esperados bajo el escenario de cambio más dramático, observamos que el aumento de temperatura y la reducción de las precipitaciones que se predicen para el final de siglo sobre la región mediterránea afectaran de manera negativa a la cobertura y biomasa fotosintéticamente activa de estos ecosistemas emblemáticos, que albergan una gran cantidad de biodiversidad e históricamente han propiciado multitud de recursos al ser humano (Maestre *et al.*, 2007) (Figura 10). Este efecto será más evidente en las zonas con valores de TWI bajos (Figura 10), mientras que, en las zonas donde se produce acumulación de agua, se verá amortiguado por el aporte extra de agua de escorrentía, que ha demostrado ser un recurso vital para la supervivencia de los espartales

(Rodríguez-Caballero *et al.*, 2018a). A largo plazo, este proceso de cambio climático producirá un cambio de la distribución espacial de la vegetación, que se concentrará en las zonas potencialmente óptimas para la acumulación de agua, apareciendo claros de mayor extensión en las laderas con un área de contribución reducida o elevada pendiente e insolación.

Además del efecto negativo directo del aumento de la aridez sobre la cobertura y biomasa de los espartales mediterráneos, y los cambios que se esperan en la distribución espacial de la vegetación como consecuencia del efecto de la topografía, debemos considerar el efecto que ejercerán los procesos de cambio climático sobre los claros entre plantas, donde se genera la mayor parte de la escorrentía (Puigdefabregas 2005). Los claros entre la vegetación en la mayoría de los espartales mediterráneos se encuentran cubiertos por otras formas de vida con necesidades hídricas menos restrictivas, como las costras biológicas del suelo o biocostras (Maestre *et al.*, 2011). Estas biocostras, formadas por algas, cianobacterias, líquenes o musgos, estabilizan el suelo entre los claros, favoreciendo la dinámica entre las fuentes y los sumideros al aportar el agua de escorrentía y los nutrientes a los parches de vegetación (Canton *et al.*, 2014; Rodríguez-Caballero *et al.*, 2018a). Sin embargo, aunque las biocostras son capaces de sobrevivir en ambientes extremos de aridez, trabajos recientes han demostrado que son muy sensibles a los procesos de degradación y cambio climático, y se espera una reducción de su cobertura para final de siglo (Rodríguez-Caballero *et al.*, 2018b). Esta pérdida de cobertura de costras biológicas aumentará la erodibilidad de los claros entre plantas, y dará lugar a la formación de flujos de escorrentía con una elevada concentración de sedimentos (Chamizo *et al.*, 2012) que se depositarán bajo las plantas impidiendo la infiltración del agua de escorrentía. Esto unido a la formación de rills y cárcavas, que actúan como flujos preferentes de escorrentía, reducirá la disponibilidad de agua para la vegetación y su cobertura y biomasa (Rodríguez-Caballero *et al.*, 2018a). A todo esto hay que sumar el efecto negativo de la presión antrópica sobre el funcionamiento de estos ecosistemas tan sensibles, que afectará de forma negativa tanto a la cubierta vegetal como a las comunidades de biocostras que ocupan los claros entre plantas, reduciendo la resiliencia del sistema (López-Ballesteros *et al.*, 2018) y haciéndolo más susceptible al aumento esperado de aridez.

5. CONCLUSIONES

Nuestros resultados demuestran que la cobertura y biomasa de los espartales del SE Ibérico están determinadas por la disponibilidad de agua, con valores mayores a medida que disminuye la aridez. Además, se observa una clara estacionalidad en los valores de NDVI. Esta estacionalidad está controlada por el estado previo de la vegetación y la aridez. La topografía, a través de su efecto en la redistribución potencial de agua y la evapotranspiración potencial, también juega un papel fundamental sobre la cobertura y actividad biológica del esparto ya que controla las variaciones espaciales de los valores de NDVI, que presenta valores más altos en las zonas de acumulación de agua. Además este efecto depende de la aridez y del estado previo de la vegetación, actuando los tres factores de manera sinérgica.

Los modelos de cambio climático predicen un aumento de la aridez en la región mediterránea. Este aumento de la aridez producirá una disminución de la cobertura y biomasa de los espartales mediterráneos, que se verá amortiguado en las zonas de acumulación de agua de escorrentía y dará lugar a un cambio en los patrones de distribución de la vegetación y por tanto a un nuevo equilibrio eco-hidrológico. Además del efecto negativo derivado del aumento de aridez sobre los espartales, deben considerarse otra serie de factores, como los cambios de cobertura en los claros entre plantas o los procesos de degradación que reducirán la resiliencia del sistema y actuarán de forma sinérgica con el cambio climático, produciendo una mayor disminución de la cobertura y biomasa de los espartales.

Las investigaciones futuras deben evaluar las sinergias entre la degradación que sufren estos ecosistemas como consecuencia de la actividad antrópica, donde los espacios de suelo entre vegetación que proveen de escorrentía al sistema y la propia vegetación son un factor clave, y los cambios en los patrones de distribución asociados al incremento de aridez fruto del cambio climático.

6. AGRADECIMIENTOS

A Yolanda Cantón y a Emilio Rodríguez-Caballero por la infinita paciencia y ayuda durante la realización del trabajo. A Isabel Miralles por permitirnos desarrollar parte del estudio en su despacho y a Andrés Reyes por su ayuda durante el procesado online de las imágenes SENTINEL-2 para la obtención del NDVI.

A mis padres, a "1100" y a mi guardiana favorita de margaritas "Su" por enseñarme a ser mejor persona aunque no se den cuenta y tampoco sepan dónde van los patos en invierno. ¡Gracias!

7. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Assouline, S., Thompson, S.E., Chen, L., Svoray, T., Sela, S. & Katul, G.G. (2015). The dual role of soil crusts in desertification. *Journal of geophysical research: Biogeosciences*, 120, 2108-2119.

Balaguer, L., Pugnaire, F.I., Martínez-Ferri, E., Armas, C., Valladares, F. & Manrique, E. (2002). Ecophysiological significance of chlorophyll loss and reduced photochemical efficiency under extreme aridity in *Stipa tenacissima* L. *Plant and Soil*, 240, 343-352.

Ben-Mariem, H. & Chaieb, M. (2017). Climate change impacts on the distribution of *Stipa tenacissima* L. ecosystems in north African arid zone - a case study in Tunisia. *Applied ecology and environmental research*, 15 (3), 67-82.

Beven, K.J. & Kirkby, M.J. (1979). A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological sciences bulletin*, 24, 43-69.

Bian, L. & Walsh, S.J. (1993). Scale dependencies of vegetation and topography in a mountainous environment of Montana. *Professional Geographer*, 45, 1-11.

Bonachela, J.A., Pringle, R.M., Sheffer, E., Coverdale, T.C., Guyton, J.A., Caylor, K.K., Levin, S.A. & Tarnita, C.E. (2015). Termite mounds can increase the robustness of dryland ecosystems to climate change. *Science*, 347, 651-655.

Blois, J.L., Williams, J.W., Fitzpatrick, M.C., Jackson, S.T. & Ferrier, S. (2013). Space can substitute for time in predicting climate-change effects on biodiversity. *Proceedings of the national academy of sciences*, 110 (23), 9374-9379.

- Buis, E., & Veldkamp, A. (2008). Modelling dynamic water redistribution patterns in arid catchments in the Negev Desert of Israel. *Earth surface processes and landforms* 33, 107-122.
- Cantón, Y., Román, R., Chamizo, S. & Moro, J. (2014). Dynamics of organic carbon losses by water erosion after biocrust removal. *Journal of hydrology and hydromechanics*, 62, 258-268.
- Chamizo, S., Cantón, Y., Miralles, I. & Domingo, F. (2012). Biological soil crust development affects physicochemical characteristics of soil surface in semiarid ecosystems. *Soil biology & biochemistry*, 49, 96-105.
- Chen, Y., Li, J., & Xu, H. (2016). Improving flood forecasting capability of physically based distributed hydrological models by parameter optimization. *Hydrology earth system science*, 20, 375-392.
- Chen, L., Sela, S., Svoray, T. & Assouline, S. (2013). The role of soil-surface sealing, microtopography, and vegetation patches in rainfall-runoff processes in semiarid areas. *Water resources research*, 49: 5585-5599.
- Cioban, A., Criveanu, H., Matei, F., Pop, I. & Rotaru, A. (2013). Aspects of solar radiation analysis using ArcGis. *Bulletin UASVM Horticulture*, 70, 437-440.
- Esau, I., Miles, V.V., Davy, R., Miles, M.W. & Kurchatova, A. (2016). Trends in normalized difference vegetation index (NDVI) associated with urban development in northern West Siberia. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16, 9563-9577.
- Farrant, J.M., Cooper, K., Kruger, L. & Sherwin, W. (1999). The effect of drying rate on the survival of three desiccation-tolerant angiosperm species. *Annals of botany*, 84, 371-379.
- Fu, P. (2000). *A geometric solar radiation model with applications in landscape ecology*. Phd Thesis, Department of Geography, University of Kansas, Kansas, USA.
- Fu, P., & Rich, P.M. (2000). *The Solar Analyst 1.0*. Manual. Helios Environmental Modeling Institute (HEMI), USA.
- Fu, P., & Rich, P.M. (2002). A Geometric solar radiation model with applications in agriculture and forestry. *Computers and Electronics in Agriculture*, 37, 25-35.

García-Ávalos, S., Rodríguez-Caballero, E., Miralles, I., Luna, L., Domene, M.A., Solé-Benet, A. & Cantón, Y. (2018). Water harvesting techniques based on terrain modification enhance vegetation survival in dryland restoration. *Catena*, 167, 319-326.

Giorgetta, M.A., Jungclaus, J., Reick, C.H., Legutke, S., Bader, J., Böttinger, M., Brovkin, V., Crueger, T., Esch, M., Fieg, K., Glushak, K., Gayler, V., Haak, H., Hollweg, H.D., Ilyina, T., Kinne, S., Kornblueh, L., Matei, D., Mauritsen, T., Mikolajewicz, U., Mueller, W., Notz, D., Pithan, F., Raddatz, T., Rast, S., Redler, R., Roeckner, E., Schmidt, H., Schnur, R., Segschneider, J., Six, K.D., Stockhause, M., Timmreck, C., Wegner, J., Widmann, H., Wieners, K.H., Claussen, M., Marotzke, J. & Giorgi, F. & Lionello, P. (2008). Climate change projections for the Mediterranean region. *Global and planetary change*, 63, 90-104. Greig-Smith, P. (1979). Pattern in vegetation: presidential address to the British Ecological Society. *Journal of ecology*, 67, 755-779.

Hargreaves, G.H. & Allen, R.G. (2003). History and evaluation of hargreaves evapotranspiration equation. *Journal of irrigation and drainage engineering*, 129, 53-63.

Hirsch, R.M., & Slack, J.R. (1984). A nonparametric trend test for seasonal data with serial dependence. *Water resources research*, 20, 727-732.

Huang, J., Yu, H., Guan, X., Wang, G., & Guo, R. (2015). Accelerated dryland expansion under climate change. *Nature climate change*, 6, 166-171.

Huber, H., Fensholt, R. & Rasmussen, K. (2011). Water availability as the driver of vegetation dynamics in the African Sahel from 1982 to 2007. *Global and planetary change*, 76, 186-195.

Hwang, T., Band, L.E., Vose, J.M. & Tague, C. (2012). Ecosystem processes at the watershed scale: Hydrologic vegetation gradient as an indicator for lateral hydrologic connectivity of headwater catchments. *Water resources research*, 48, 1-16.

IPCC, (2013). *The Physical Science Basis*. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of The Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., et al (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

IPCC, (2014). *Climate Change 2014: Synthesis Report*. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.

Ladrón de Guevara, M., Lázaro, R., Arnau-Rosalén, E., Domingo, F., Molina-Sanchis, I & Mora, J.L. (2015). Climate change effects in a semiarid grassland: physiological responses to shifts in rain patterns. *Acta oecologica*, 69, 9-20.

Lefever, R. & Lejeune, O. (1997). On the origin of tiger bush. *Bulletin of mathematical biology*, 59, 263-294.

López-Ballesteros, A., Oyonarte, C., Kowalski, A.S., Serrano-Ortiz, P., Sánchez-Cañete, E.P., Moya, M.R. & Domingo, F. (2018). Can land degradation drive differences in the C exchange of two similar semiarid ecosystems?. *Biogeosciences*, 15, 263-278.

Louhaichi, M., Salem, F.B., Tarhouni, M. & Belgacem, O., (2016), Modelling the impact of human climate change on *Stipa tenacisiima* distribution in the arid and semi-arid rangelands of north Africa. *The future management of grazing and wild lands in a high tech world: Proceedings 10th International Rangeland Congress* pp: 999-1000. Saskatoon, Canada.

Ludwing, B., Helfrich, M. & Flessa, H. (2005). Modelling the long-term stabilization of carbon from maize in a silty soil. *Plant soil*, 278, 315-325.

Maestre, F.T. (2002). *La restauración de la cubierta vegetal en zonas semiáridas en función del patrón espacial de factores bióticos y abióticos*. Alicante, Universidad de Alicante. ISBN: 84-688-0089-9

Maestre, F.T., Bowker, M.A., Cantón, Y., Castillo-Monroy, A.P., Cortina, J., Escolar, C., Escudero, A., Lázaro, R. & Martínez I. (2011). Ecology and functional roles of biological soil crusts in semi-arid ecosystems of Spain. *Journal of Arid Environments*, 75, 1282-1291.

Maestre, F.T. (2004). On the importance of patch attributes, environmental factors and past human impacts as determinants of perennial plant species richness and diversity in Mediterranean semiarid steppes. *Diversity and distributions*, 10, 21-29.

Maestre, F.T. & Cortina, J. (2004). Insights into ecosystem composition and function in a sequence of degraded semiarid steppes. *Restoration Ecology*, 12 (4), 495-502.

Maestre, F.T., Ramírez, D.A. & Cortina, J. (2007). Ecología del esparto (*Stipa tenacissima* L.) y los espartales de la Península Ibérica. *Ecosistemas*, 16 (2), 111-130.

Magliano, P.N., Breshaers, D.D., Fernández, R.J. & Jobbágy, G. (2015). Rainfall intensity switches ecohydrological runoff/runon redistribution patterns in dryland vegetation patches. *Ecological applications*, 25, 2094-2100.

Mayor, A.G., Bautista, S., Small, E.E., Dixon, M. & Bellot, J. (2008). Measurement of the connectivity of runoff source areas as determined by vegetation pattern and topography: a tool for assessing potential water and soil losses in drylands. *Water resources research*, 44, 1-13.

Monger, H.C. & Bestelmeyer, B.T. (2006). The soil-geomorphic template and biotic change in arid and semi-arid ecosystems. *Journal of arid environments*, 65, 207-218.

Monteith, J.L. & Szeicz, G. (1962). Radiative temperature in the heat balance of natural surfaces. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 88, 496–507.

Moore, I.D., Burch, G.J. & Mackenzie, D.H. (1988). Topographic effects on the distribution of surface soil water and the location of ephemeral gullies. *American society of agricultural engineers*, 31, 1098-1107.

Moss, R.H., Edmonds, J.A., Hibbard, K.A., Manning, M.R., Rose, S.K., Detler, P., Vuuren, V., Carter, T.R., Emori, S., Kainuma, M., Kram, T., Meehl, G.A., Mitchel, J.F.B., Nakicenovi, N., Riahi, K., Smith, S.J., Stouffer, R.J., Thompson, A.M., Weyant, J.P. & Wilbanks, T. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463, 747-756.

Muñoz, J.D. & Kravchenko, A. (2012). Deriving the optimal scale for relating topographic attributes and cover crop plant biomass. *Geomorphology*, 179, 197-207.

Peters, P.C.D. & Harvstad, K.M. (2006). Nonlinear dynamics in arid and semi-arid systems: interactions among drivers and processes across scales. *Journal of arid environments*, 65, 196-206.

Pugnaire, F.I., Armas, C. & Maestre, F.T., (2011). Positive plant interaction in the Iberian Southeast: mechanisms, environmental gradients, and ecosystem function. *Journal of arid environments*, 75, 1310-1320.

Pugnaire, F.I., Haase, P., Puigdefábregas, J., Cueto, M., Clarck S.C. & Incoll L.D. (1996). Facilitation and succession under the canopy of a leguminous shrub, *Retama sphaerocarpa*, in a semi-arid environment in the South-East Spain. *Oikos*, 76, 455-464.

Puigdefábregas, J., Solé-Benet, A., Gutiérrez, L., Del Barrio, G. & Boer, M. (1999). Scales and processes of water and sediment redistribution in drylands: results from the Rambla Honda field site in Southeast Spain. *Earth-science reviews*, 48, 39-70.

Puigdefábregas, J. (2005). The role of vegetation patterns in structuring runoff and sediment fluxes in drylands. *Earth surface processes and landforms*, 30, 133-147.

Ramirez, D.A, Bellot, J., Domingo, F. & Blasco, A. (2007). Can water responses in *Stipa tenacissima* L. during the summer season be promoted by non-rainfall water gains in soil? *Plant and soil*, 291, 67-79.

Reynolds, F.J., Stafford Smith, D.M., Lambin, E.F., Turner, B.L. Mortimore, M., Batterbury, S.P.J., Downing, T.E., Dowlatabadi, H., Fernandez, R.J., Herrick, J.E., Huber-Sannwald, E., Jiang, H., Leemans, R., Lynam, T., Maestre, F.T., Ayarza, M. & Walker, B. (2007). Global desertification: building a science for dryland development. *Science*, 316, 847-851.

Riahi, K., Rao, S., Krey, V., Cho, C., Chirkov, V., Fischer, G., Kindermann, G., Nakicenovic, N. & Rafaj, P. (2011). RCP 8.5- A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. *Climatic change*, 109, 33-57.

Rich, P.M., Dubayah, R., Hetrick, W.A. & Saving, S.C. (1994). Using view shed models to calculate intercepted solar radiation: applications in ecology. *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing Technical Papers*, 524-529.

Rodríguez-Caballero, E. (2013). *Cross-scale effects of biological soil crusts on runoff generation and water erosion in semiarid ecosystems. Field data and model approach*. Almería, Universidad de Almería. ISBN: 978-84-16027-36-1.

Rodríguez-Caballero, E., Cantón, Y., Lazaro, R. & Solé-Benet, A. (2014). Cross-scale interactions between surface components and rainfall properties. Non-linearities in the hydrological and erosive behavior of semiarid catchments. *Journal of hydrology*, 517, 815-825.

Rodríguez-Caballero, E., Chamizo, S., Roncero-Ramos, B., Román, R. & Cantón, Y. (2018a). Runoff from biocrust: a vital resource for vegetation performance on Mediterranean steppes. *Ecohydrology* e1977, 1-13.

Rodríguez-Caballero, E., Belnap, J., Büdel, B., Crutzen, P.J., Andreae, M.O., Pöschl, U. & Weber, B. (2018b). Dryland photoautotrophic soil surface communities endangered by global change. *Nature geoscience*, 11, 185-189.

Rouse, J.R., Haas, R.H., Deering, D.W. & Schell, J.A. (1974). Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation. *College Station, Texas University*, 1-87.

Safriel, U., Adeel, Z., Niemeije, D., Puigdefabregas, J., White, R., Lal, R., Winslow, M., Ziedler, J., Prince, S., Archer, E., *et al.*, (2005). *Drylands systems*. In: Millennium Ecosystem Assessment. 2005. Ecosystems and Human Well-being: Current state and trends. Island Press, Washington, DC, 585-622.

Sheffer, E., Hardenbergm J.V., Shachak, M. & Meron, E. (2013). Emerged or imposed: a theory on the role of physical templates and self-organisation for vegetation patchiness. *Ecology letters*, 16, 127-139. Shi, G. (2014). *Data Mining and Knowledge Discovery for Geoscientists*. Beijing, China. Elsevier Inc. ISBN: 978-0-12-410437-2.

Soudani, K., Hmimina, G., Delpierre, N., Pontailier, J.Y., Aubinet, M., Bonal, D., Caquet, B., Grandcourt, A., Burban, B., Flechard, C., Guyon, D., Granier, A., Gross, P., Heinesh, B., Longdoz, B., Loustau, D., Moureaux, C., Ourcival J.M., Rambal, S., Saint-André, L. & Dufrêne, E. (2012). Ground-based network of NDVI measurements for tracking temporal dynamics of canopy structure and vegetation phenology in different biomes. *Remote sensing of environment*, 123, 234-345.

Stevens, B. (2013). Climate and carbon cycle changes from 1850 to 2100 in MPI-ESM simulations for the Coupled Model Intercomparison Project phase 5. *Journal of Advances in Modelling Earth Systems*, 5, 572–597.

Thompson, E.S., Harman, C.J., Troch, P.A., Brooks, P.D. & Sivapalan, M. (2011). Spatial scale dependence of ecohydrologically mediated water balance partitioning: A synthesis framework for catchment ecohydrology. *Water resources research*, 47, 1-20.

UNEP (United Nations Environment Programme), 1997. *World atlas of desertification*. 2 Edition. UNEP, London.

Ustuner, M., Sanli, F.B. & Dixon, B. (2015). Application of support vector machines for landuse classification using high-resolution RapidEye images: a sensitivity analysis. *European Journal of Remote Sensing*, 48, 403-422.

Valladares, F. & Pugnaire, F.I. (1999). Tradeoffs between irradiance capture and avoidance in semiarid environments simulated with a crown architecture model. *Annals of botany*, 83, 459-470.

Van vuuren, D.P. & Riahi, K. (2011). The relationship between short-term emissions and long-term concentration targets-a letter. *Climatic change*, 104, 793-801.

Wang, L., D'odorico, P., Evans, J.P., Eldridge, D.J., McCabe, M.F., Caylor, K.K. & King, E.G. (2012). Dryland ecohydrology and climate change: critical issues and technical advances. *Hydrology and earth system sciences*, 16, 2585-2603.

ANEXO 1: TABLAS

Tabla S1. Localización y características climáticas de las parcelas de estudio para el periodo 1971-2000. Los campos señalados (*) fueron extraídos de Maestre (2002), Maestre (2004) y Maestre & Cortina (2004).

Parcelas *	ID	UTM (WGS) *	Altitud* (m.s.n.m.)	Área (Ha)	Precipitación media anual (mm/año)	Temperatura media anual (°C)	Temperatura máxima anual (°C)	Temperatura mínima anual (°C)	Aridez climática
Aguas	1	4267250.685 731320.932	441	5.92	400	16	21	10	0.30
Albatera	2	4235612.068682889.337	355	3.51	304	17	23	11	0.33
Campello	3	4263850.722728300.859	349	9.07	431	16	22	11	0.33
Colominas	4	4273683.891692065.747	726	8.50	349	14	21	8	0.30
Etasa	5	4261761.816720358.794	205	4.97	385	17	23	11	0.32
Finestrat	6	4270837.527744942.118	212	4.58	355	17	22	12	0.28
Foncalent 1	7	4245286.832712768.515	80	9.62	292	18	23	13	0.27
Foncalent 2	8	4246396.826713461.528	63	4.35	293	18	23	13	0.33
Fortuna	9	4214958.393666055.263	99	5.22	299	18	25	12	0.32
Jijona	10	4263622.83720201.801	240	6.67	384	17	22	11	0.32
La Nuza	11	4260205.651730850.854	102	8.43	441	18	23	12	0.39
Marquesa	12	4259324.683727861.815	85	9.54	460	18	23	12	0.43
Palomaret	13	4261430.947703005.751	540	3.64	313	16	21	10	0.36
Peñarrubia	14	4273369.917690049.727	769	9.13	350	14	20	8	0.38
Relleu	15	4269297.649735480.923	395	3.15	338	16	22	11	0.39
Ventós 1	16	4259539.941707657.714	468	2.45	311	16	22	10	0.46
Ventós 2	17	4260475.937707395.728	550	4.12	322	15	21	10	0.46

Tabla S2. Estaciones meteorológicas y características climáticas de las parcelas de estudio para el año hidrológico 2016/2017.

Parcelas	ID	Estación meteorológica	Altitud estación (m.s.n.m.)	Precipitación anual (mm/año)	Temperatura media (°C)	Temperatura máxima (°C)	Temperatura mínima (°C)	Aridez
Aguas	1	Benidorm	70	414.4	20	24	15	0.23
Albatera	2	Abanilla	174	364.4	19	25	12	0.24
Campello	3	Benidorm	70	414.4	20	24	15	0.24
Colominas	4	Villena	486	341.4	15	23	8	0.24
Etasa	5	Benidorm	70	414.4	20	24	15	0.25
Finestrat	6	Benidorm	70	414.4	20	24	15	0.28
Foncalent 1	7	Alicante Aeropuerto	43	424.1	20	25	15	0.31
Foncalent 2	8	Alicante Aeropuerto	43	424.1	20	25	15	0.39
Fortuna	9	Murcia	61	388.4	20	26	14	0.41
Jijona	10	Benidorm	70	414.4	20	24	15	0.41
La Nuza	11	Benidorm	70	414.4	20	24	15	0.44
Marquesa	12	Benidorm	70	414.4	20	24	15	0.45
Palomaret	13	Novelda	230	286.4	19	24	14	0.45
Peñarrubia	14	Villena	486	341.4	15	23	8	0.47
Relleu	15	Alicante	81	435.6	19	24	14	0.47
Ventós 1	16	Novelda	230	286.4	19	24	14	0.47
Ventós 2	17	Novelda	230	286.4	19	24	14	0.49

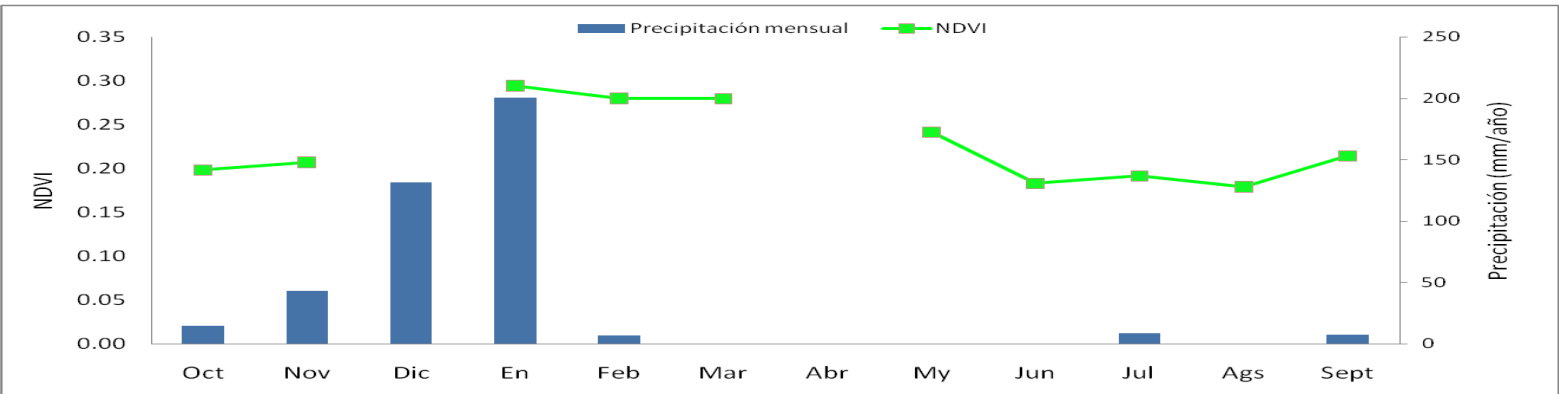
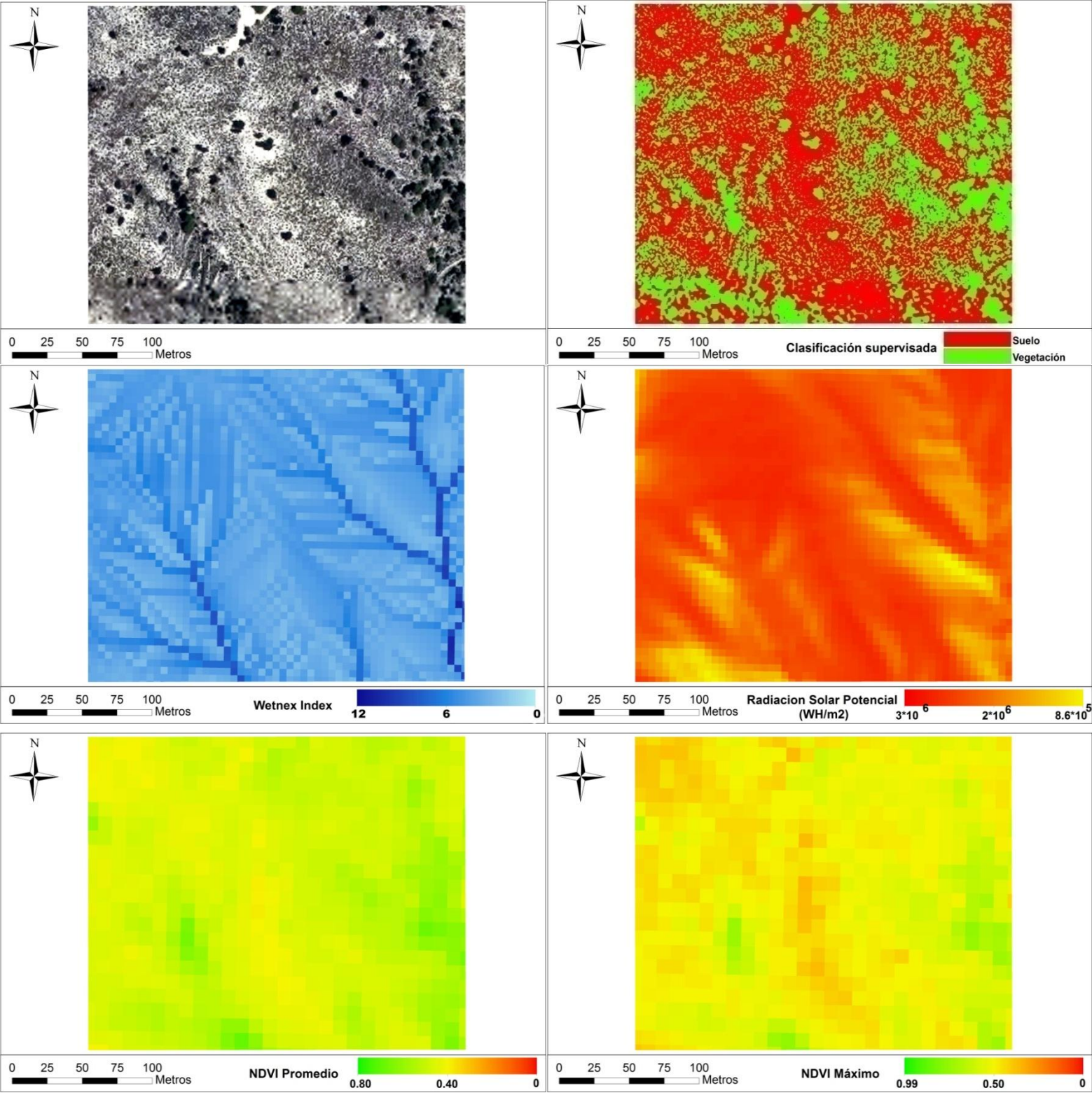
Tabla S3. Resumen de la respuesta espectral de la vegetación, cobertura e índices topográficos empleados durante los análisis para cada una de las parcelas de estudio.

Parcelas	ID	NDVI Promedio	NDVI Máximo	Momento NDVI Máximo	NDVI Mínimo	Rango NDVI	Cobertura vegetal (%)	TWI Promedio	Radiación solar (WH/m ²)
Aguas	1	0.23	0.30	Enero	0.17	0.13	41.45	4.3	2.73*10 ⁶
Albatera	2	0.22	0.29	Marzo, Mayo	0.14	0.15	44.34	4.2	2.71*10 ⁶
Campello	3	0.22	0.29	Febrero, Marzo, Mayo	0.13	0.16	61.18	4.3	2.65*10 ⁶
Colominas	4	0.30	0.35	Febrero	0.25	0.10	57.97	4.6	2.82*10 ⁶
Etasa	5	0.15	0.23	Marzo	0.09	0.14	22.97	4.3	2.54*10 ⁶
Finestrat	6	0.21	0.27	Enero	0.14	0.13	53.83	4.3	2.64*10 ⁶
Foncalent 1	7	0.22	0.29	Mayo	0.14	0.15	53.58	5.2	2.42*10 ⁶
Foncalent 2	8	0.15	0.21	Marzo, Mayo	0.10	0.11	39.16	4.4	2.47*10 ⁶
Fortuna	9	0.21	0.31	Marzo	0.10	0.21	38.63	4.7	2.55*10 ⁶
Jijona	10	0.14	0.19	Marzo	0.10	0.09	26.98	4.5	2.53*10 ⁶
La Nuza	11	0.20	0.26	Marzo	0.13	0.13	52.16	4.0	2.45*10 ⁶
Marquesa	12	0.21	0.28	Febrero, Marzo	0.15	0.13	44.80	4.2	2.52*10 ⁶
Palomaret	13	0.18	0.24	Mayo	0.11	0.13	39.01	4.6	2.77*10 ⁶
Peñarrubia	14	0.32	0.37	Febrero	0.26	0.10	68.68	4.4	2.90*10 ⁶
Relleu	15	0.18	0.24	Marzo	0.10	0.14	32.33	4.6	2.72*10 ⁶
Ventós 1	16	0.18	0.24	Febrero, Marzo	0.10	0.14	47.19	4.2	2.67*10 ⁶
Ventós 2	17	0.21	0.26	Febrero	0.15	0.11	46.14	4.5	2.70*10 ⁶

ANEXO 2: FIGURA S1

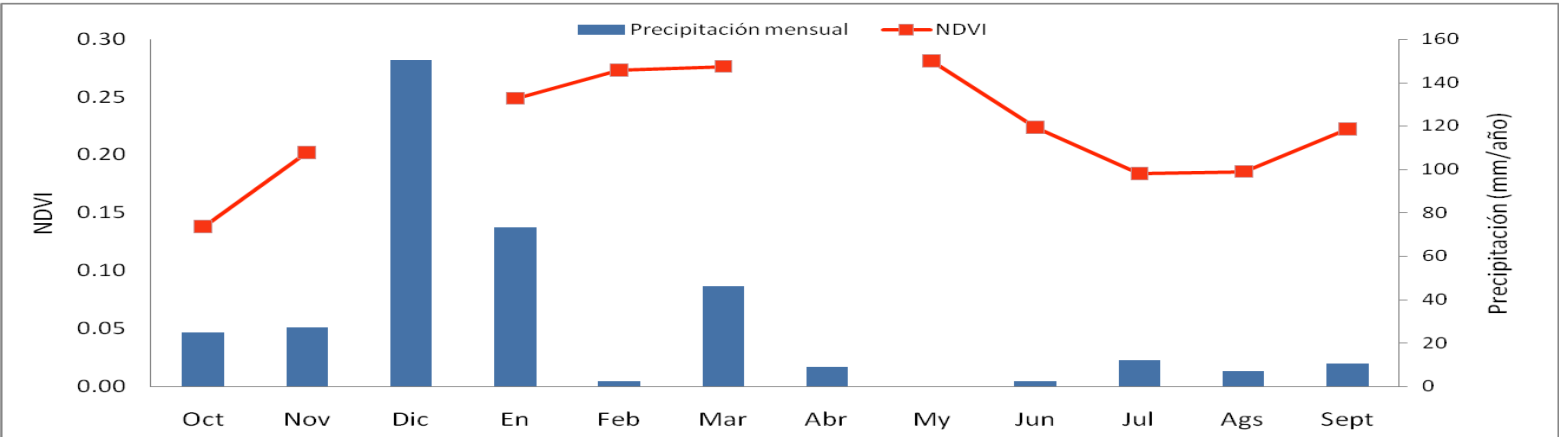
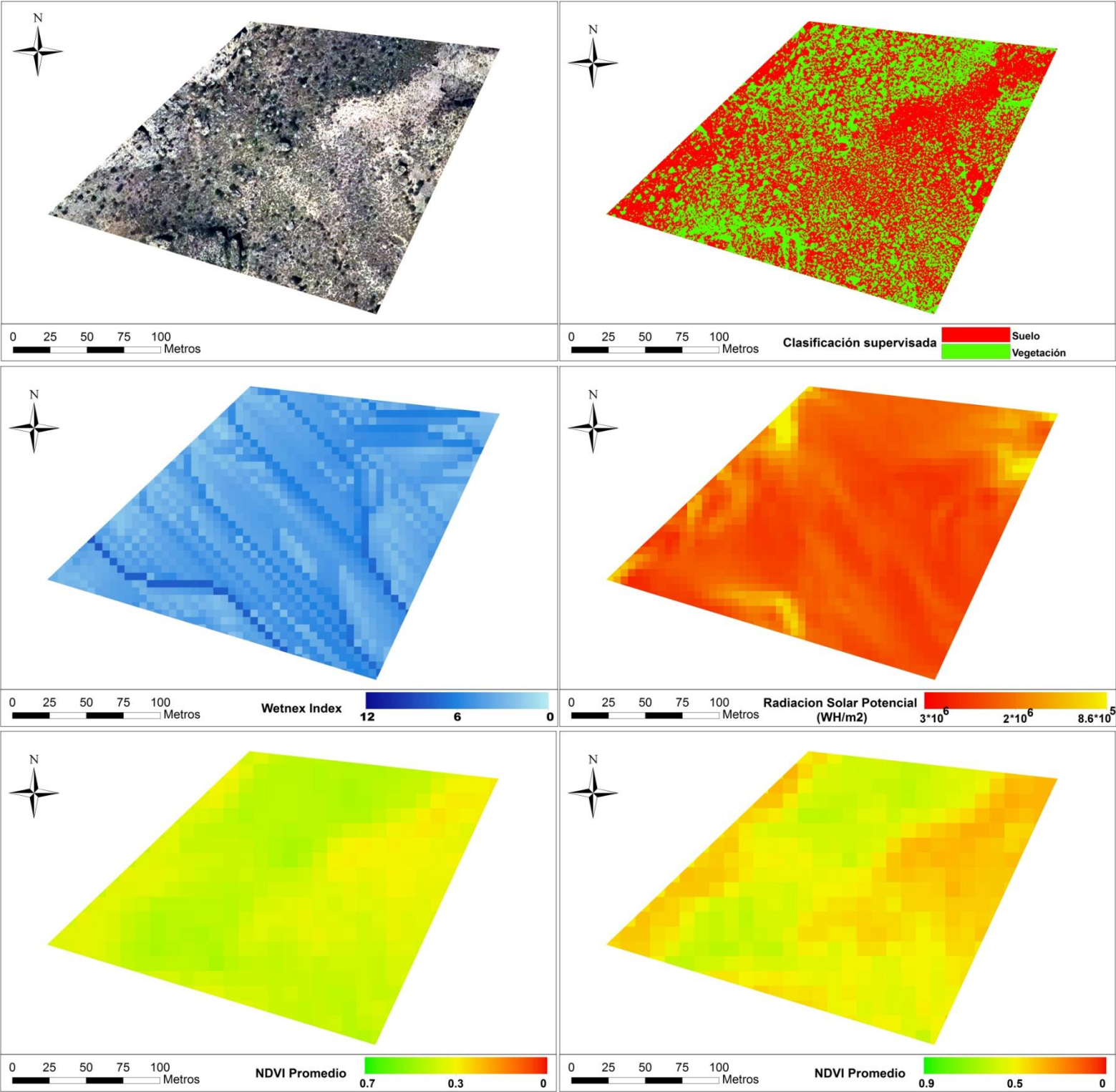
Nombre de la parcela: Aguas
UTM: 30S 4267250 731320
Altura: 441 m.s.n.m.

Precipitación media anual: 400 mm/año
T° media: 16 °C
Área: 5.92 Ha



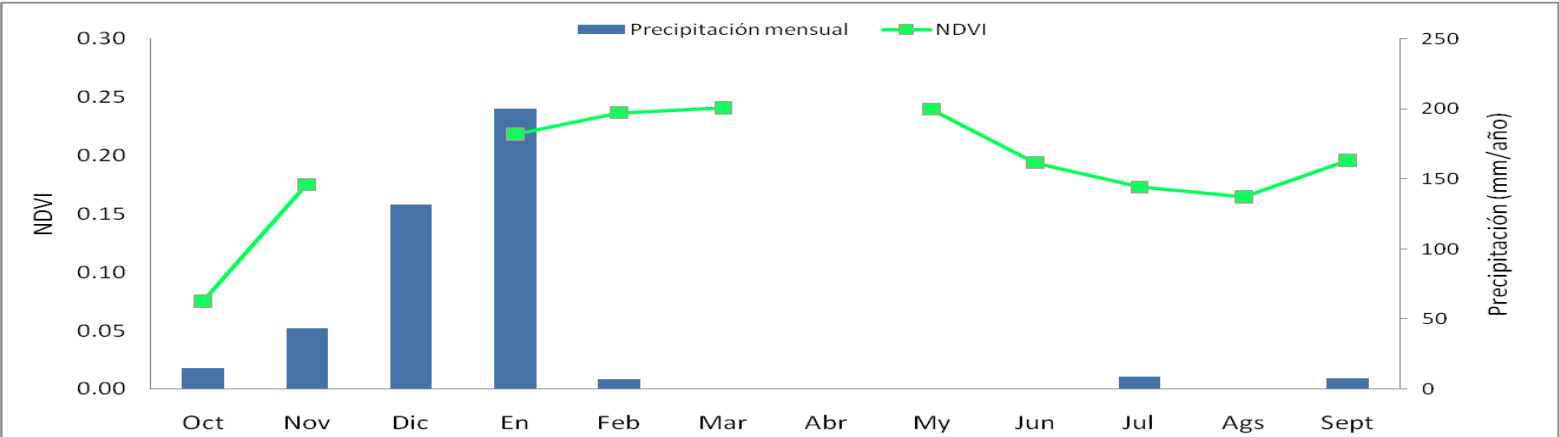
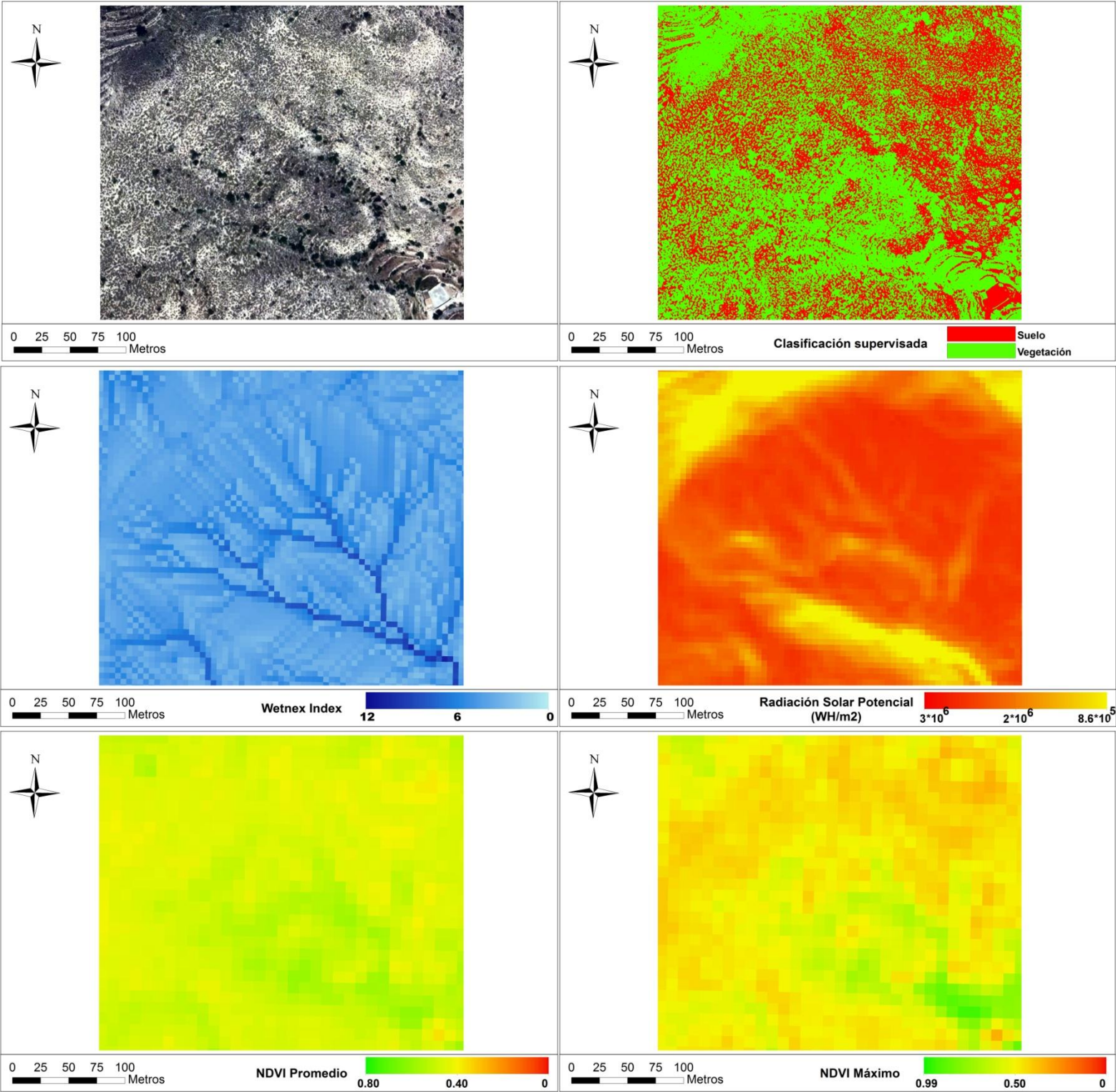
Nombre de la parcela: Albatera
UTM (WGS): 30S 4235612 682889
Altura: 355 m.s.n.m.

Precipitación media anual: 304 mm/año
T° media: 17 °C
Área: 3.51 Ha



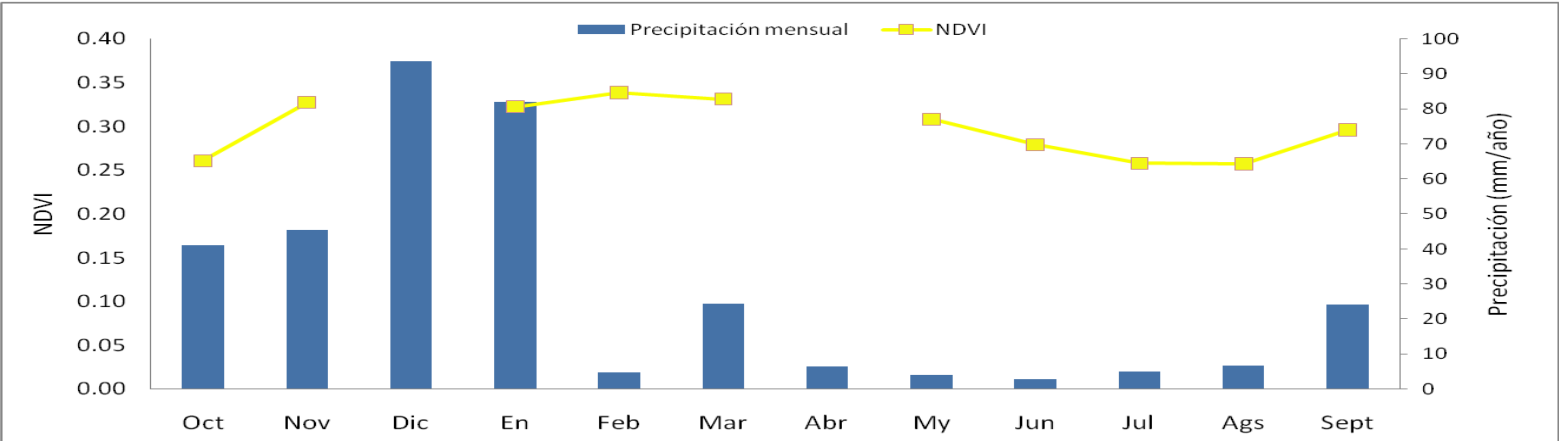
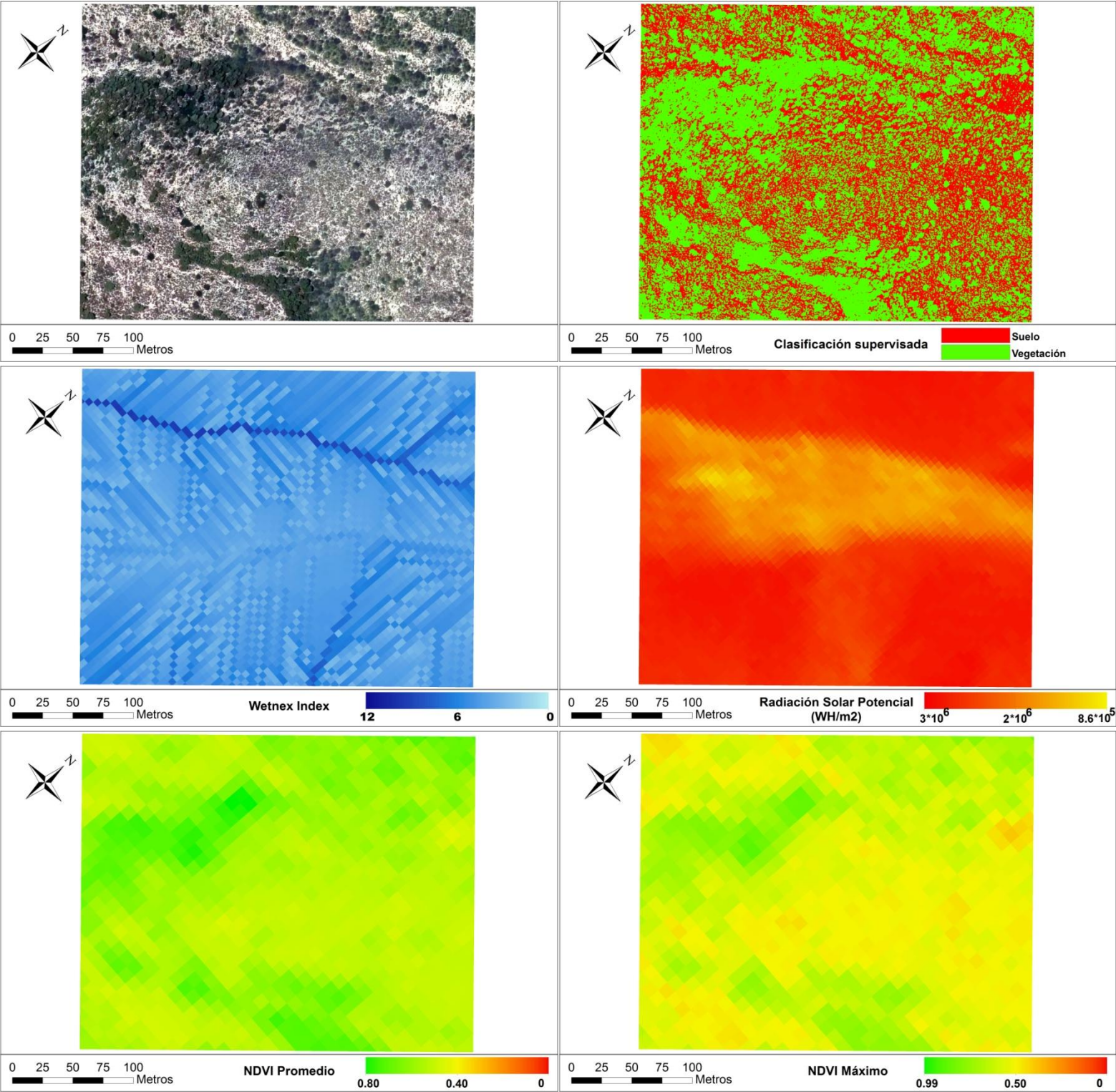
Nombre de la parcela: Campello
UTM: 30S 4263850 728300
Altura: 349 m.s.n.m.

Precipitación media anual: 431 mm/año
Tª media: 16 °C
Área: 9.07 Ha



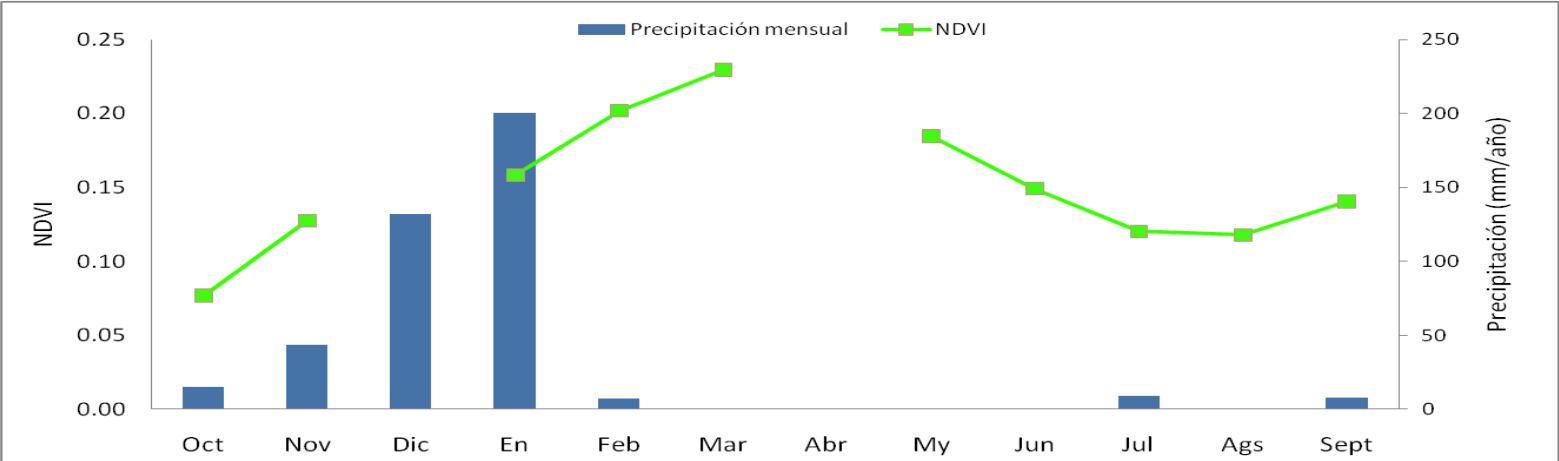
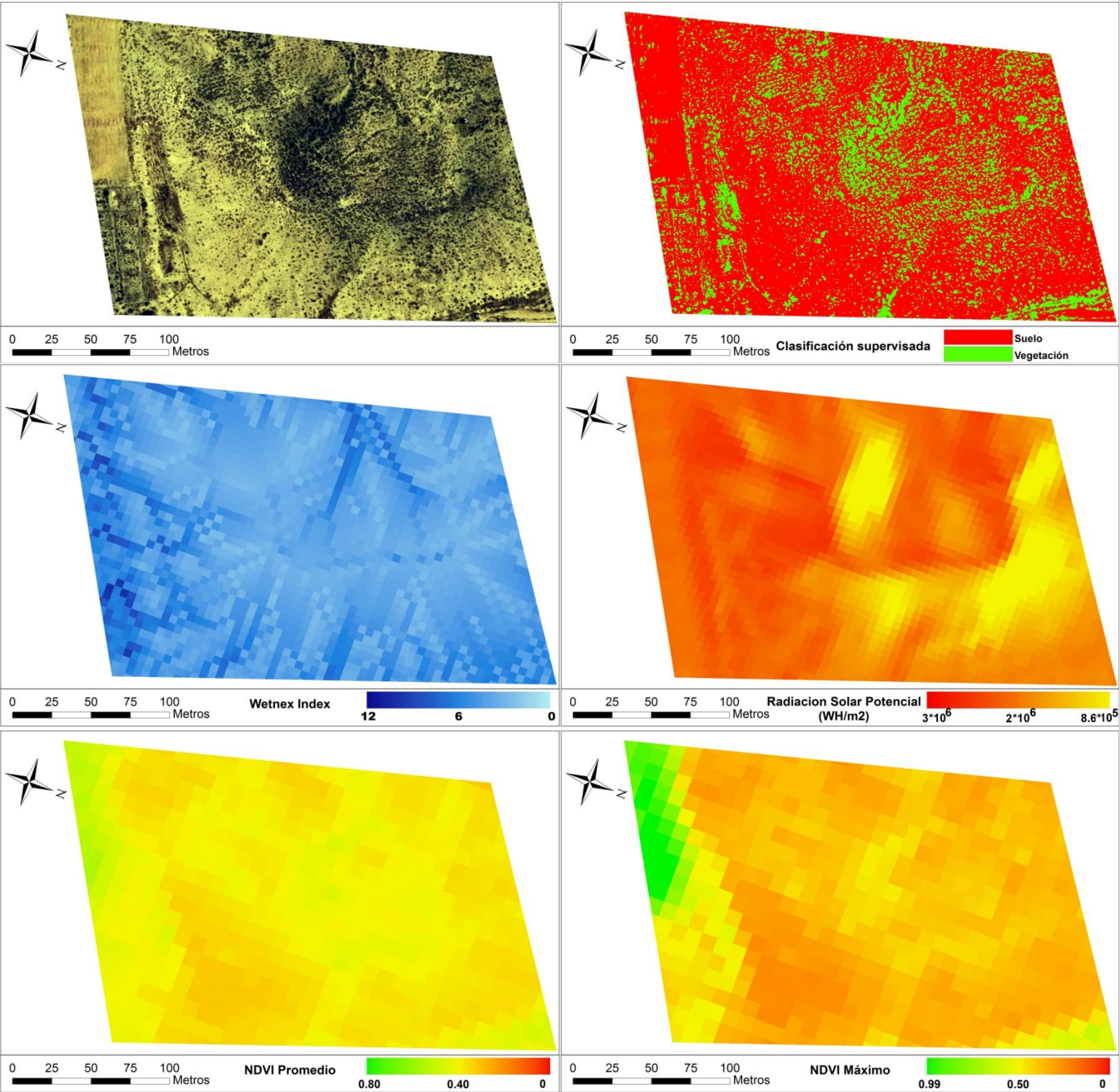
Nombre de la parcela: Colominas
UTM (WGS): 30S 4273683 692065
Altura: 726 m.s.n.m.

Precipitación media anual: 349 mm/año
Tª media: 14 °C
Área: 8.5 Ha



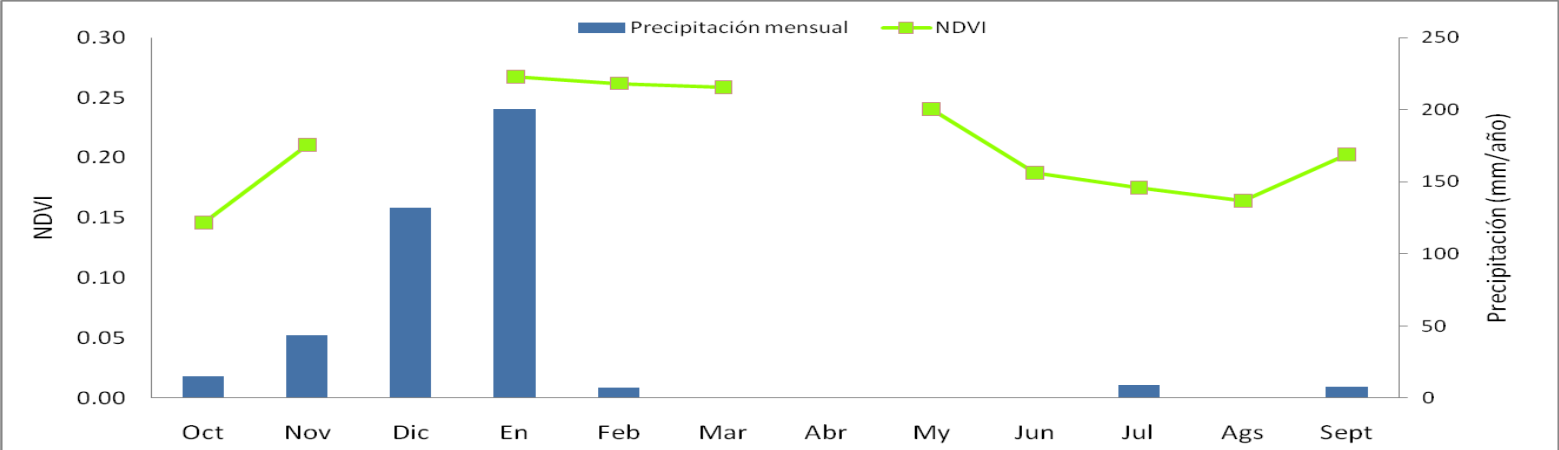
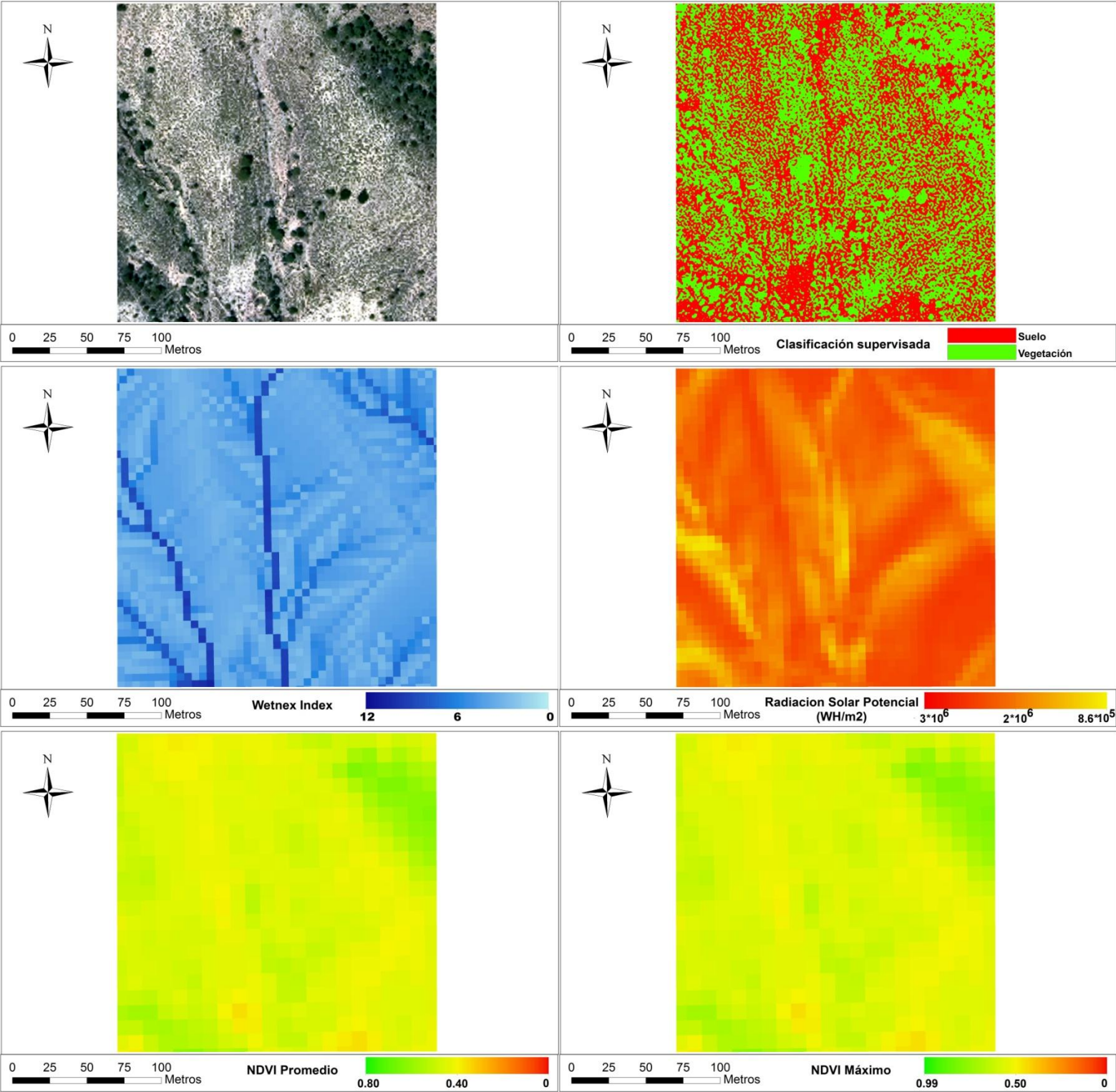
Nombre de la parcela: Etasa
UTM (WGS): 30S 4261761 720358
Altura: 205 m.s.n.m.

Precipitación media anual: 385 mm/año
Tª media: 17 °C
Área: 4.58 Ha



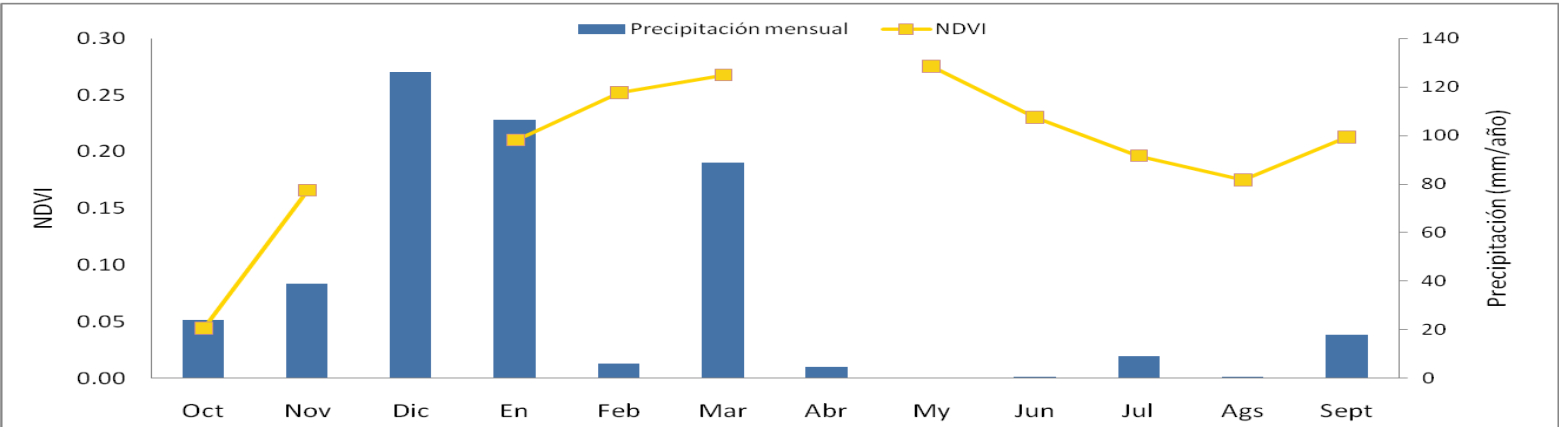
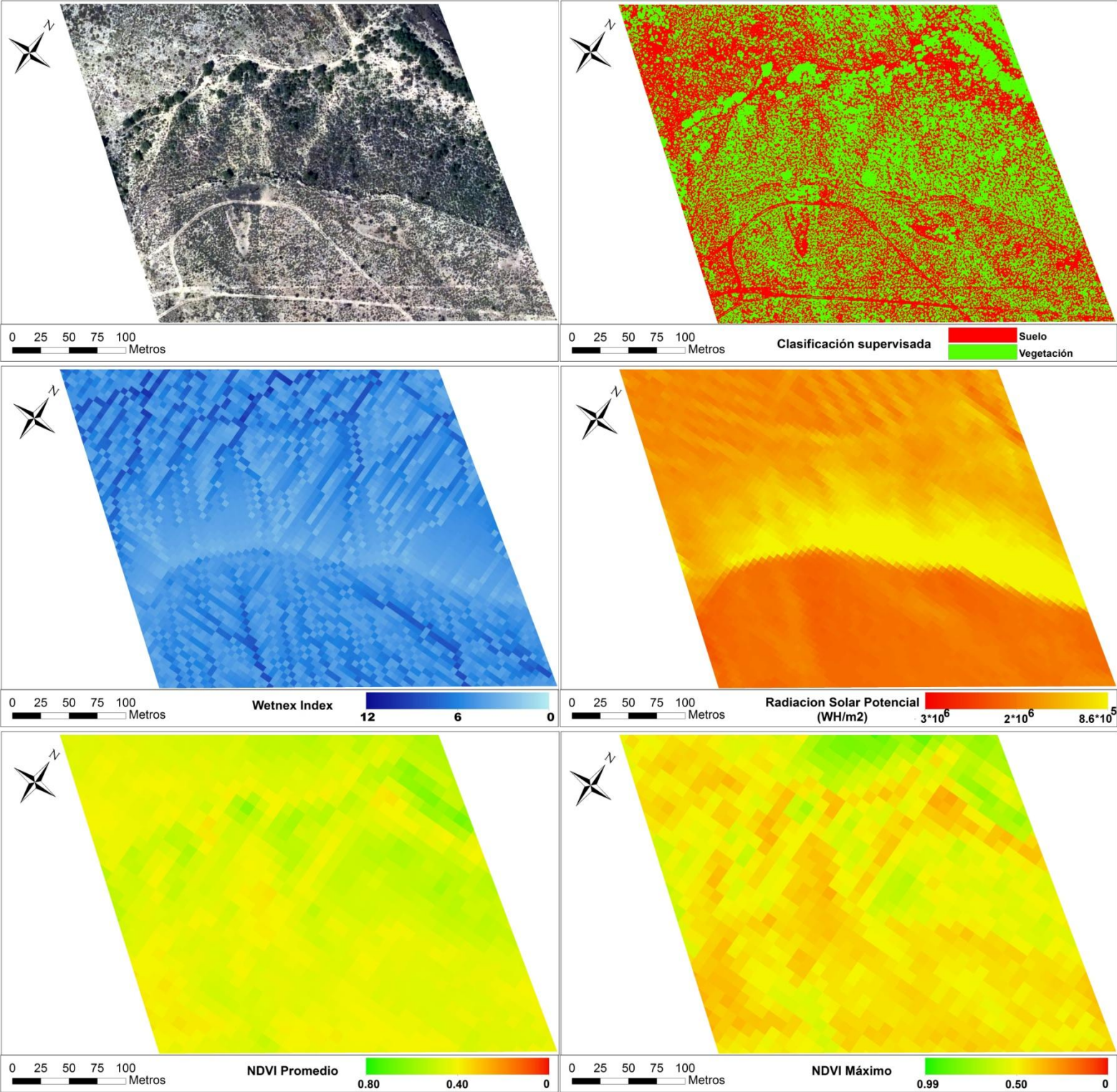
Nombre de la parcela: Finestrat
UTM (WGS): 30S 4270837 744942
Altura: 212 m.s.n.m.

Precipitación media anual: 355 mm/año
Tª media: 17 °C
Área: 4.58 Ha



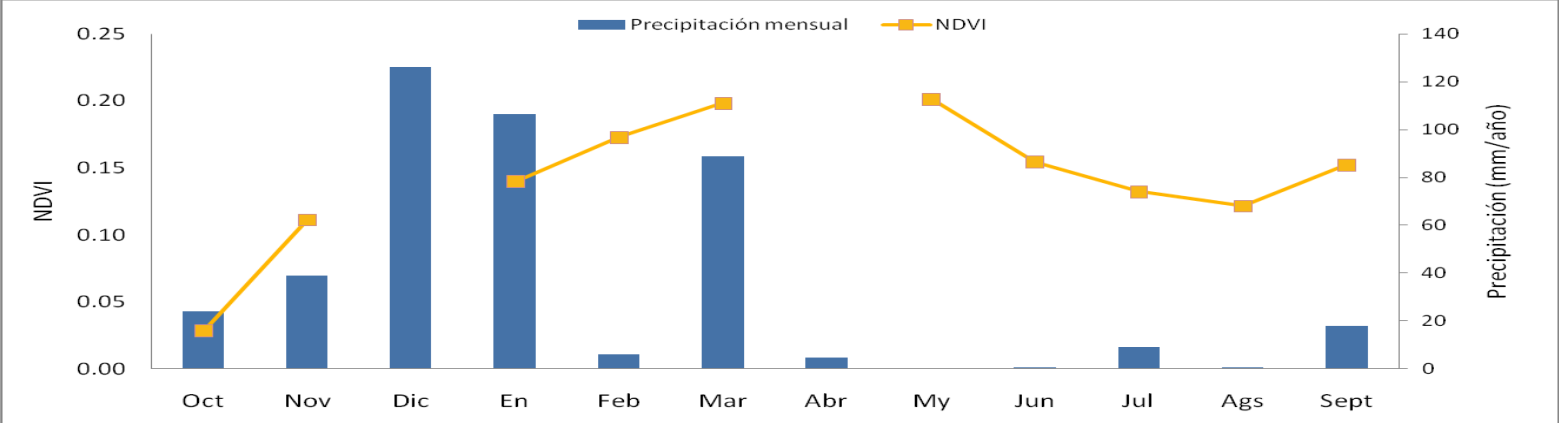
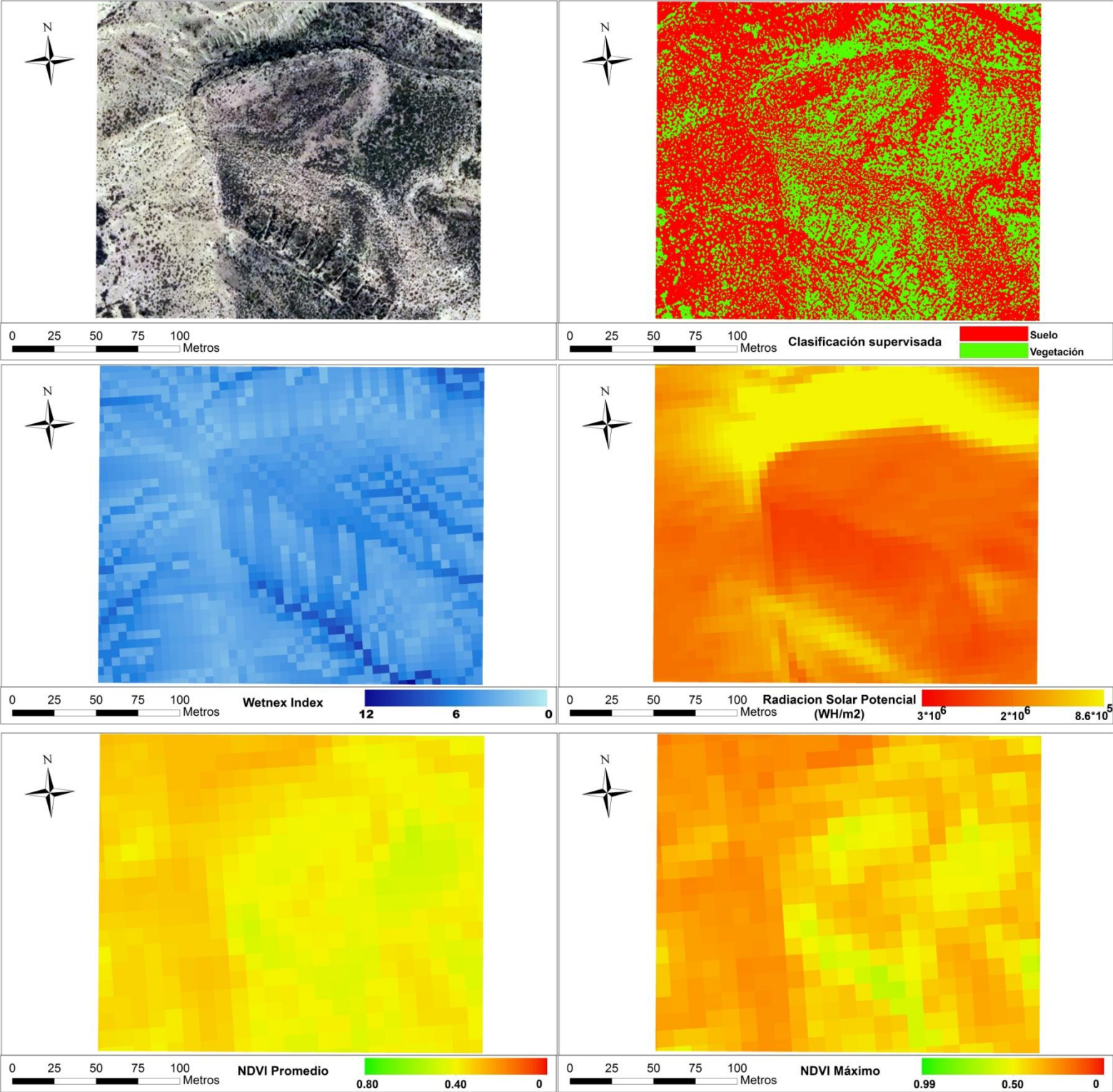
Nombre de la parcela: Foncalent 1
UTM (WGS): 30S 4245286 712768
Altura: 80 m.s.n.m.

Precipitación media anual: 292 mm/año
Tª media: 18 °C
Área: 9.62 Ha



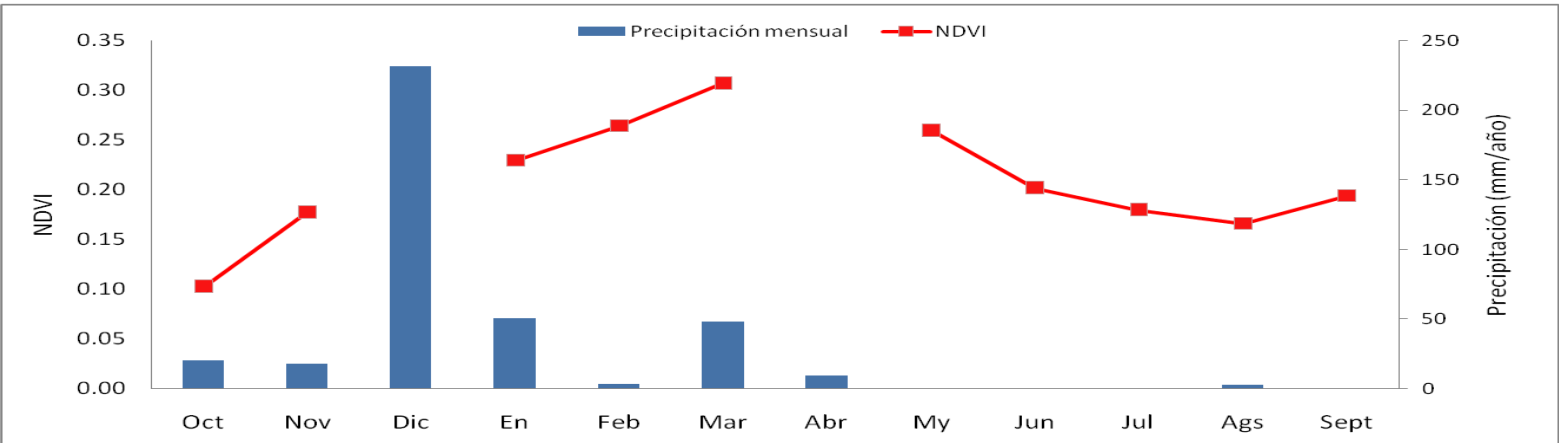
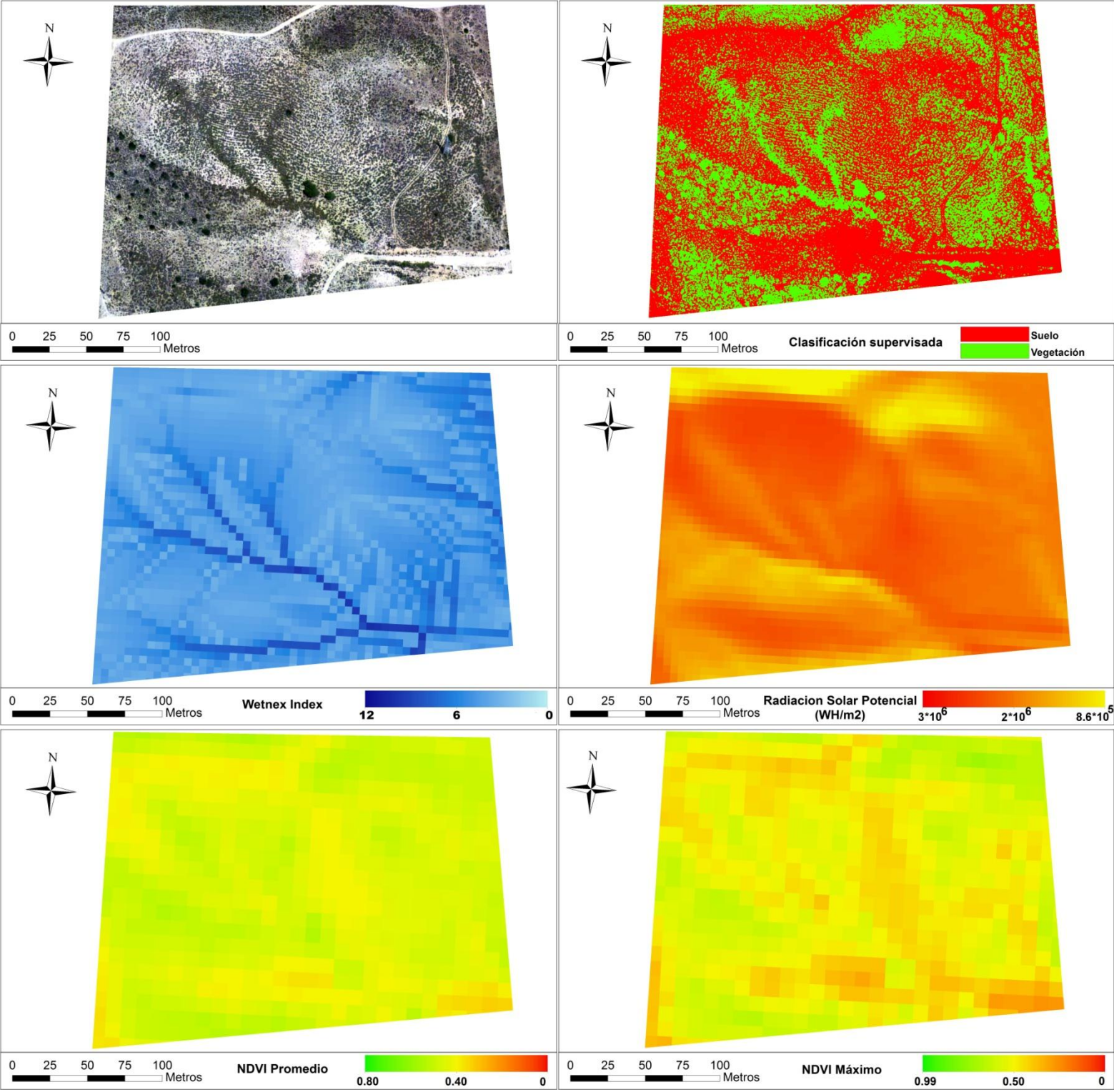
Nombre de la parcela: Foncalent 2
UTM (WGS): 30S 4246396 713461
Altura: 63 m.s.n.m.

Precipitación media anual: 293 mm/año
Tª media: 18 °C
Área: 4.35 Ha



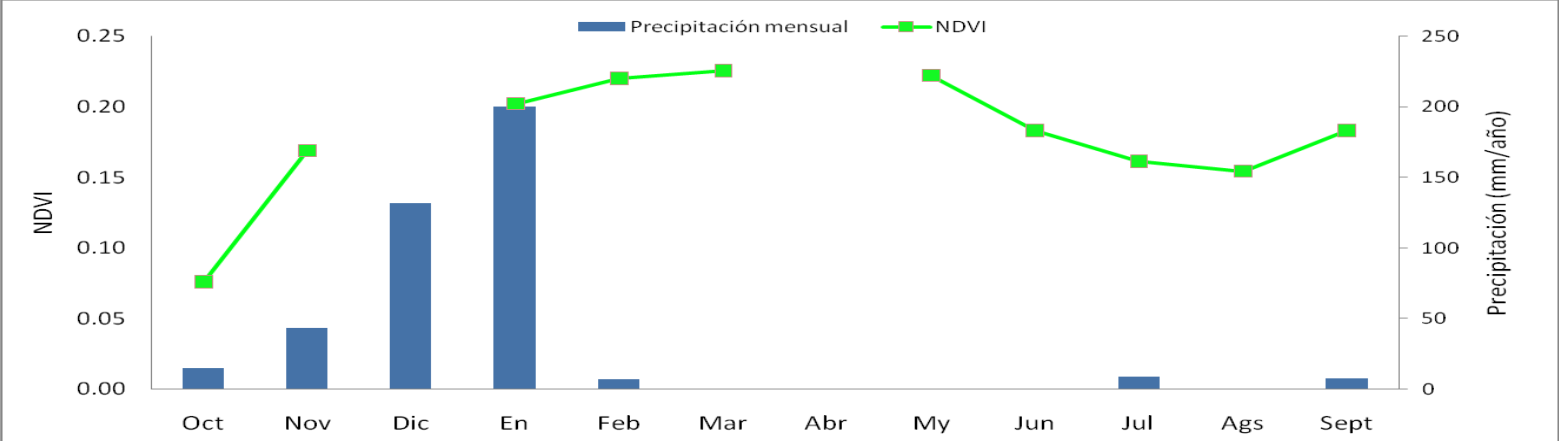
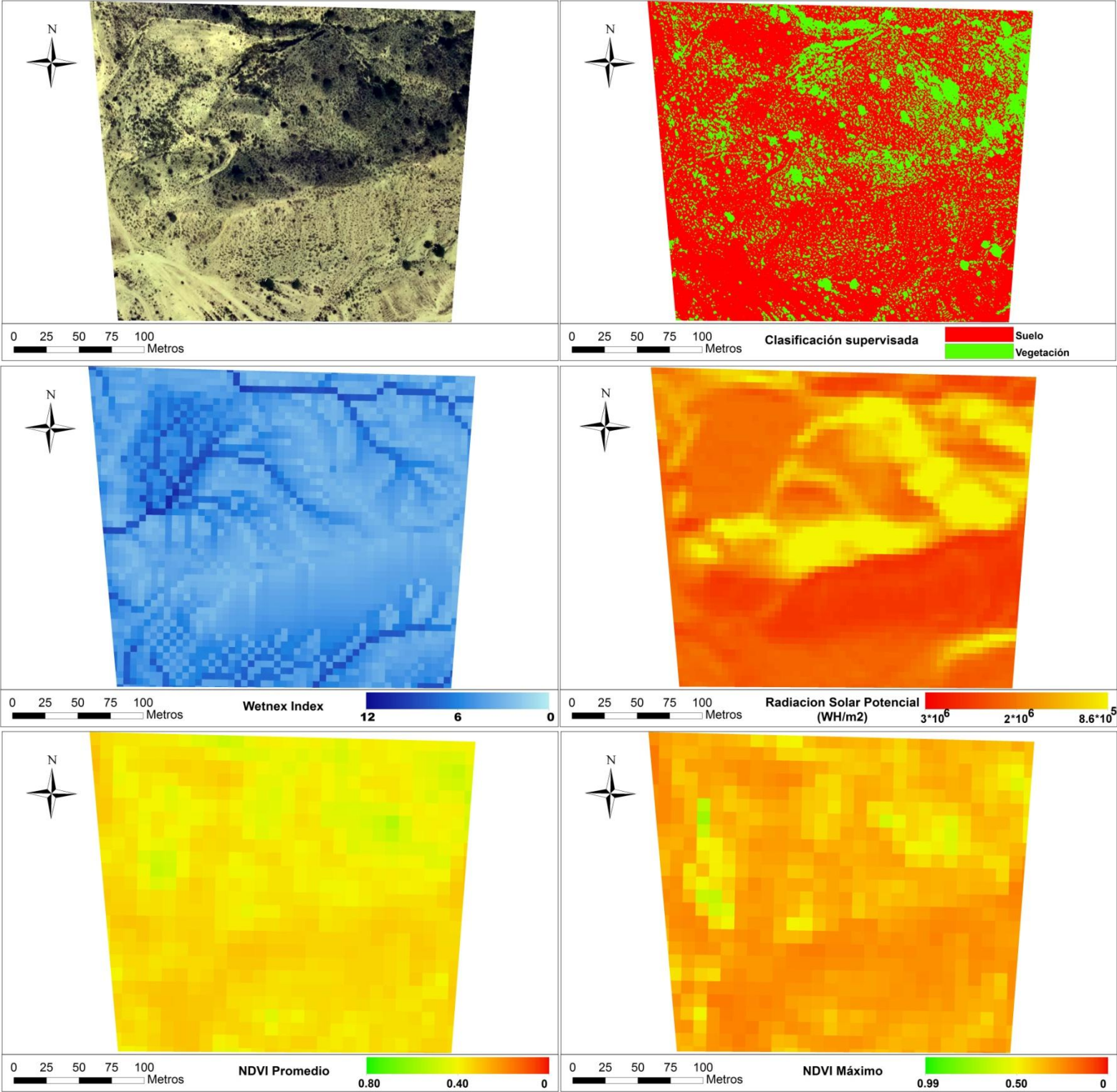
Nombre de la parcela: Fortuna
UTM (WGS): 30S 4214958 666055
Altura: 99 m.s.n.m.

Precipitación media anual: 299 mm/año
Tª media: 18 °C
Área: 5.22 Ha



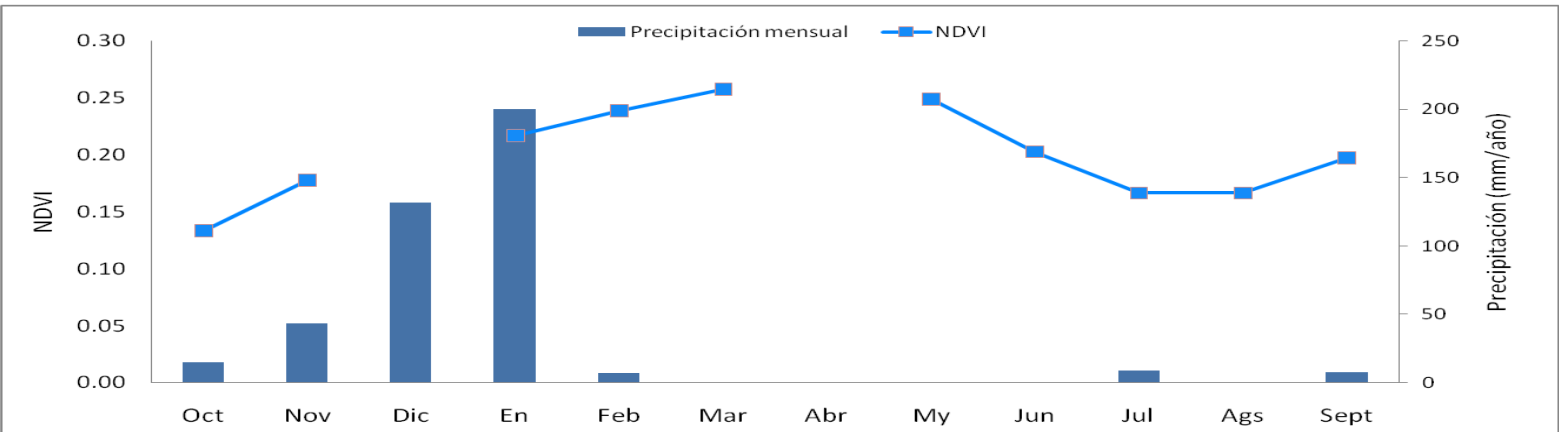
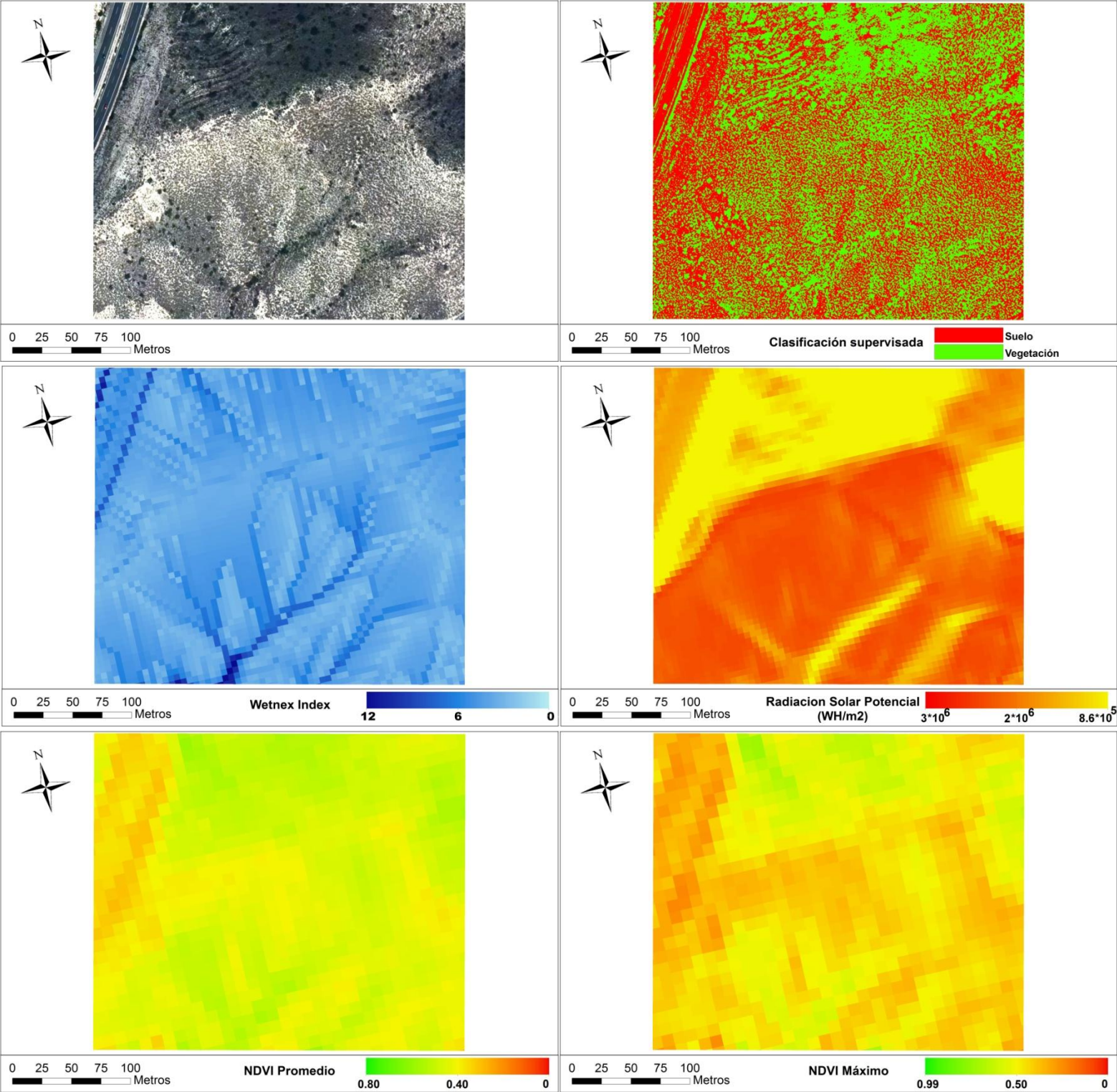
Nombre de la parcela: Jijona
UTM (WGS): 30S 4263622 720201
Altura: 240 m.s.n.m.

Precipitación media anual: 384 mm/año
Tª media: 17 °C
Área: 6.67 Ha



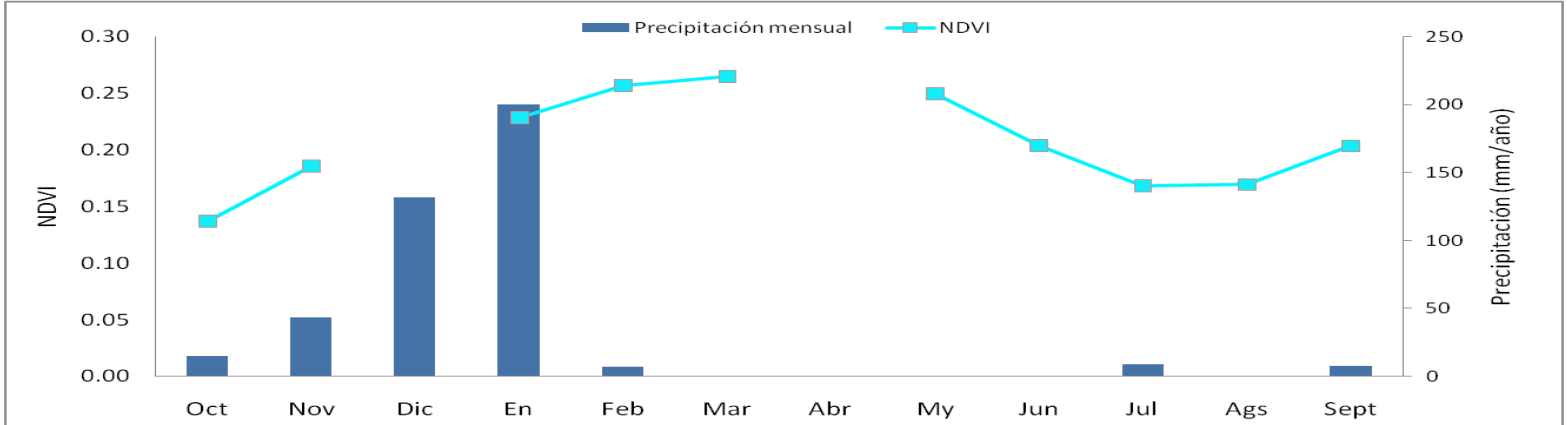
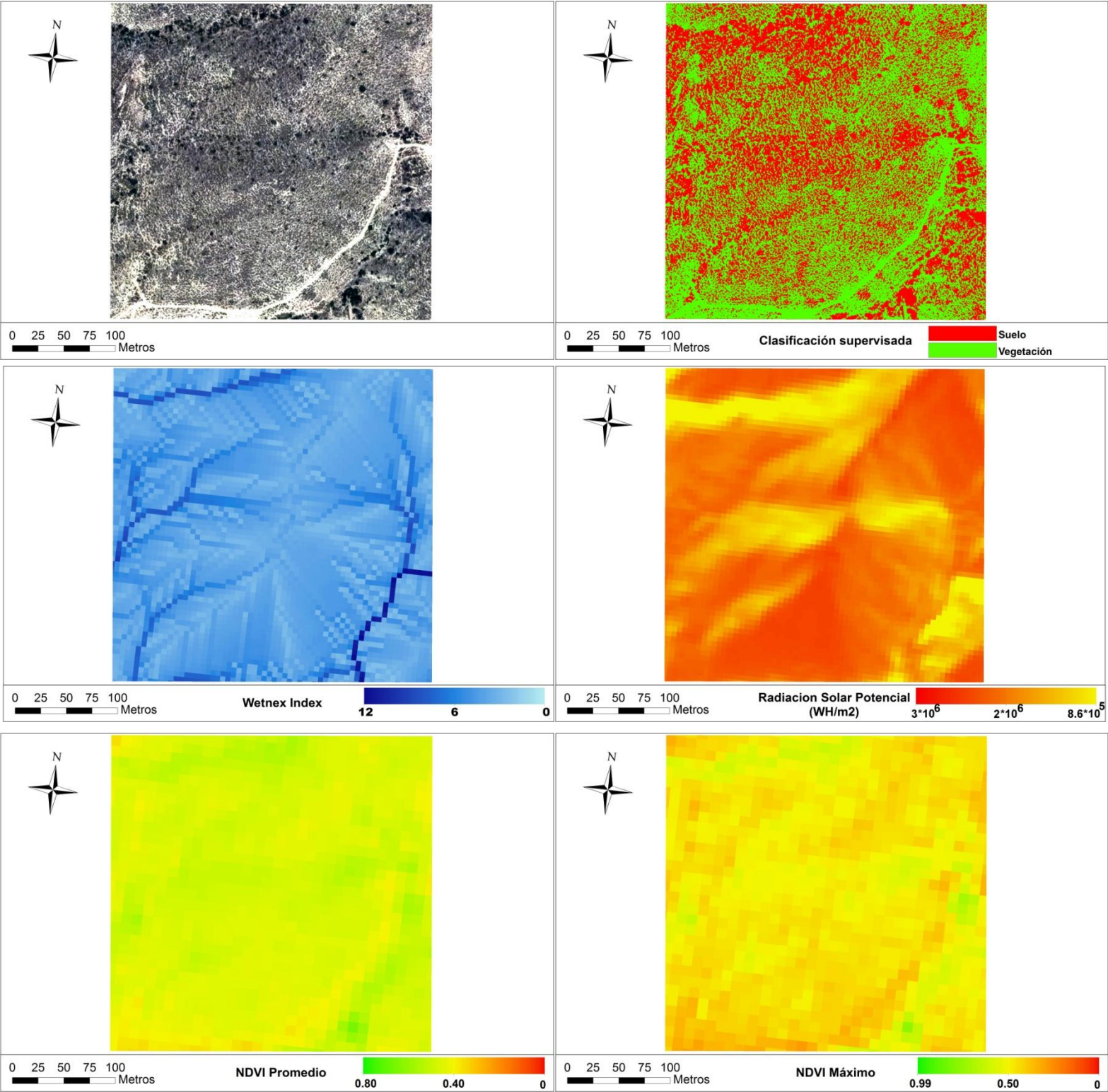
Nombre de la parcela: La Nuza
UTM (WGS): 30S 4260205 730850
Altura: 102 m.s.n.m.

Precipitación media anual: 441 mm/año
Tª media: 18 °C
Área: 8.43 Ha



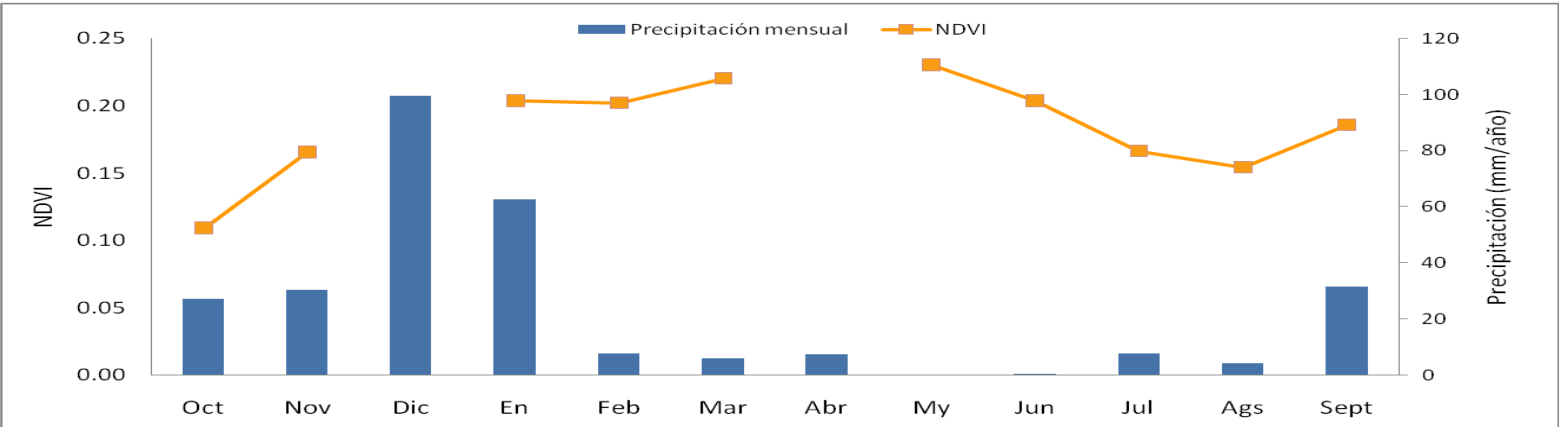
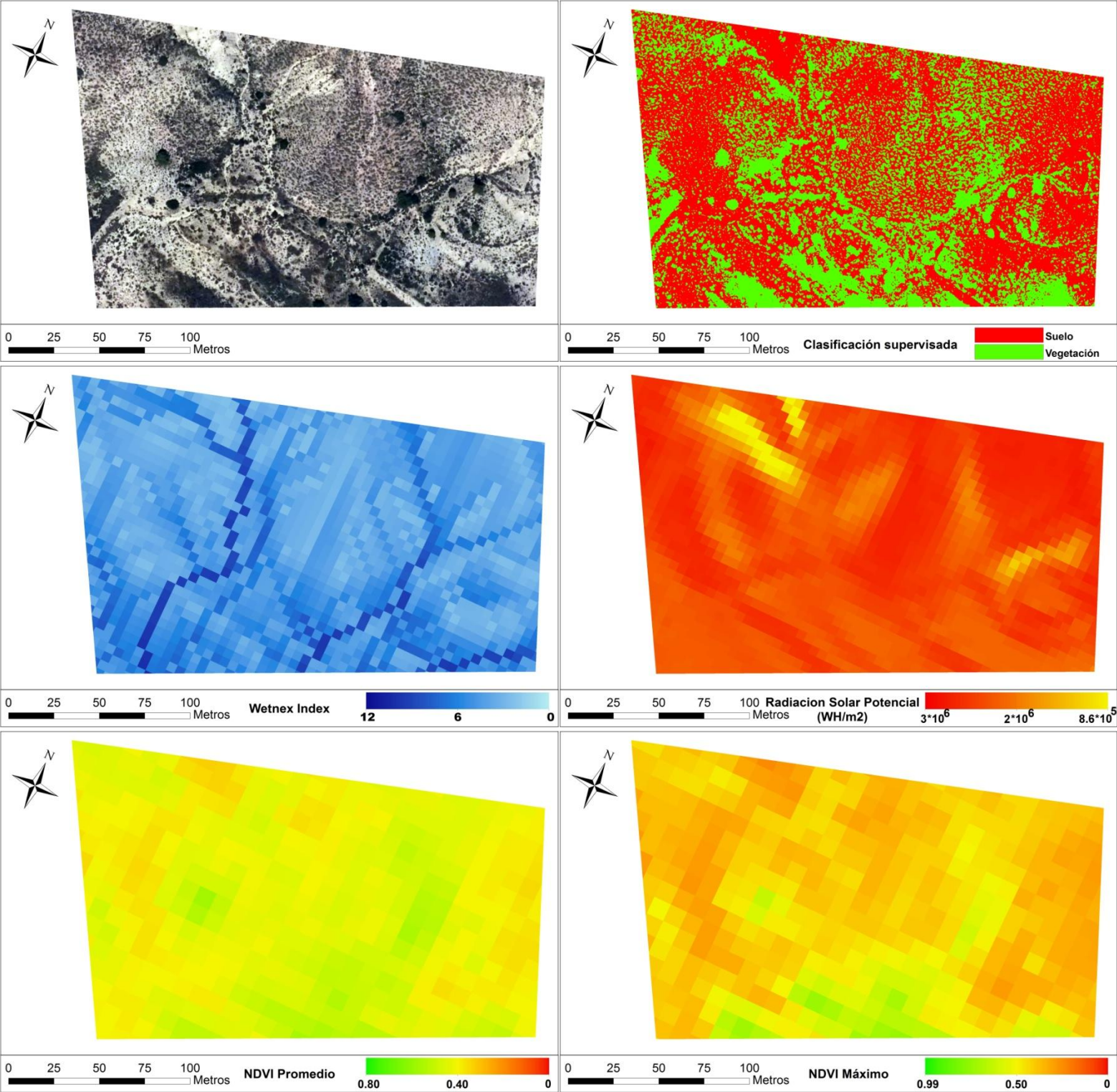
Nombre de la parcela: Marquesa
UTM (WGS): 30S 4259324 727861
Altura: 85 m.s.n.m.

Precipitación media anual: 460 mm/año
Tª media: 18 °C
Área: 9.54 Ha



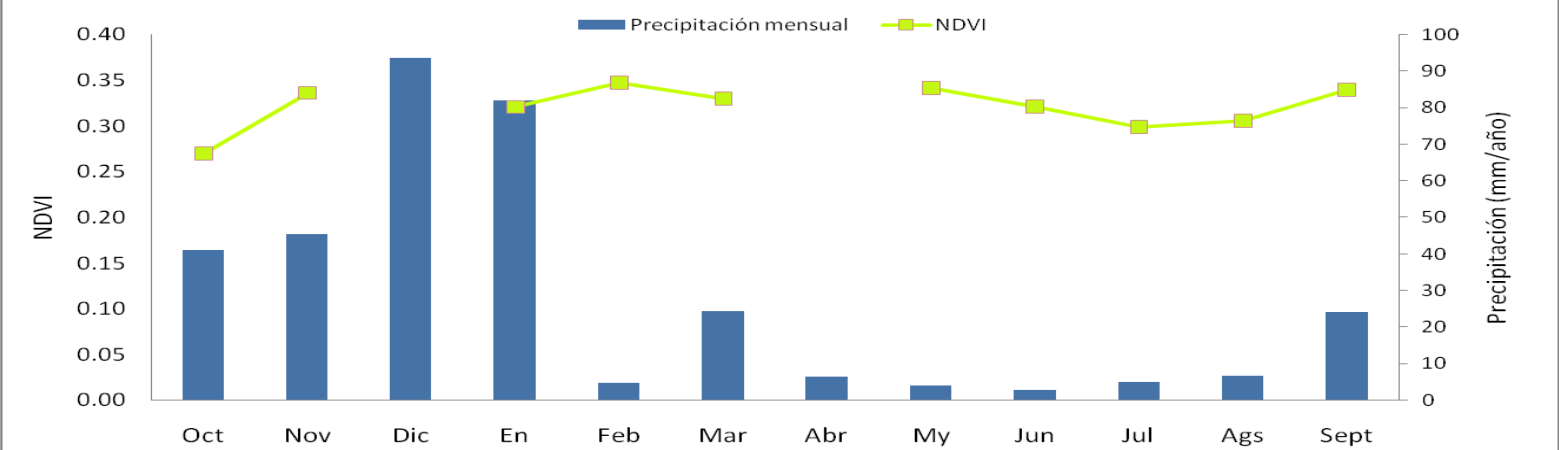
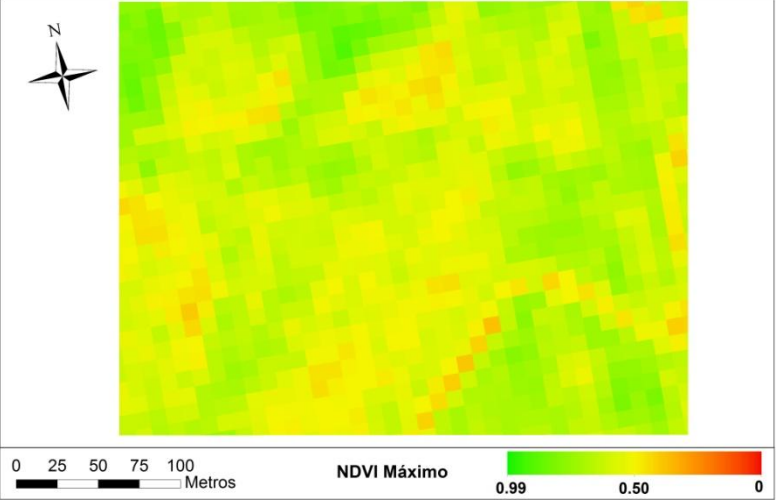
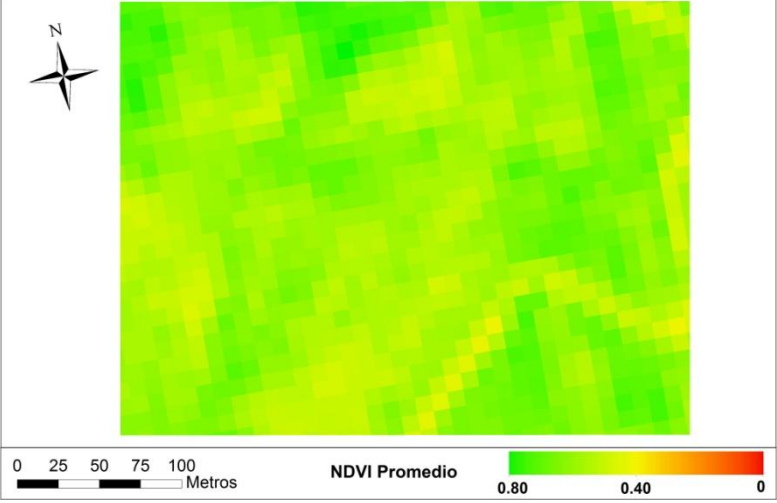
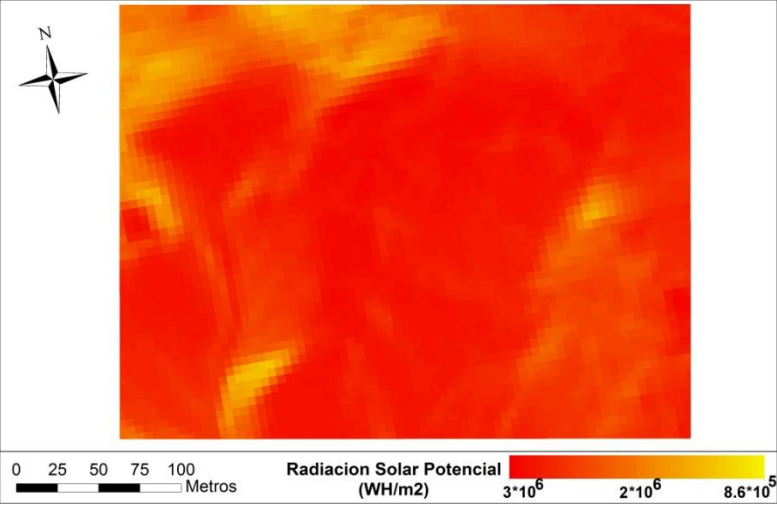
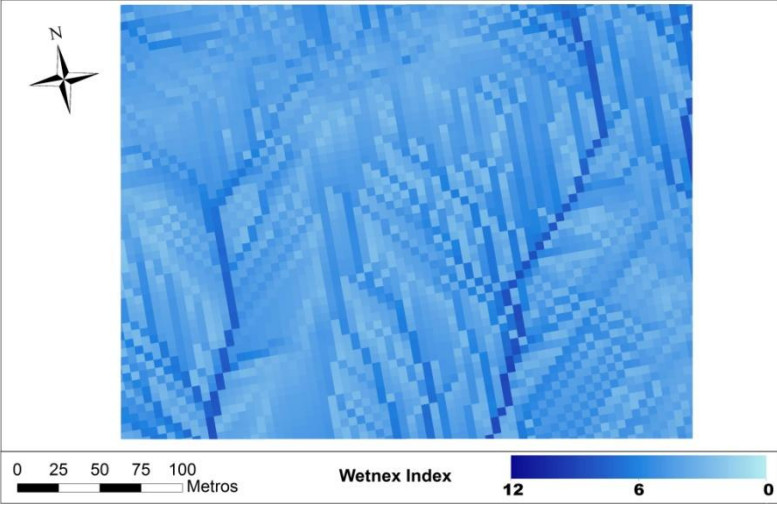
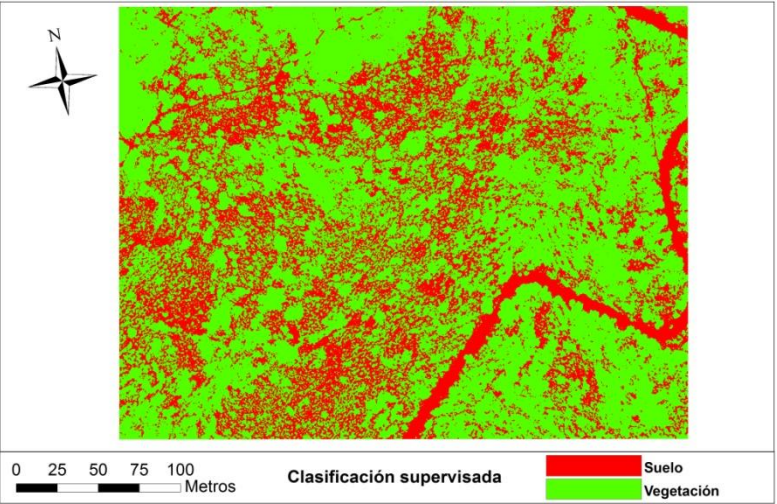
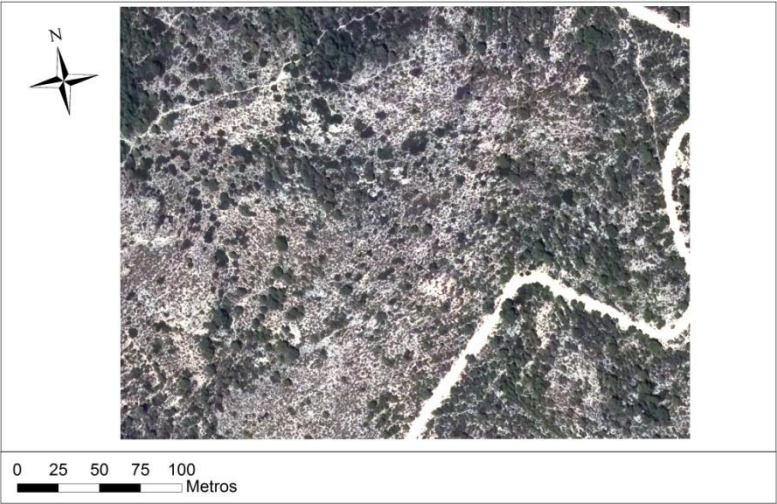
Nombre de la parcela: Palomaret
UTM (WGS): 30S 4261430 703005
Altura: 540 m.s.n.m.

Precipitación media anual: 313 mm/año
Tª media: 16 °C
Área: 3.64 Ha



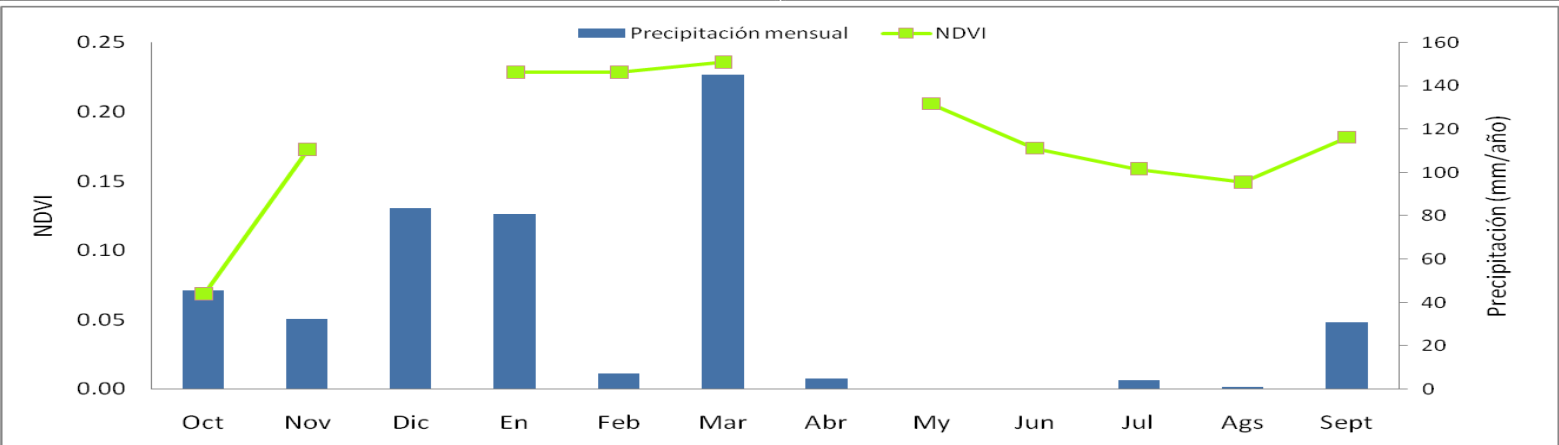
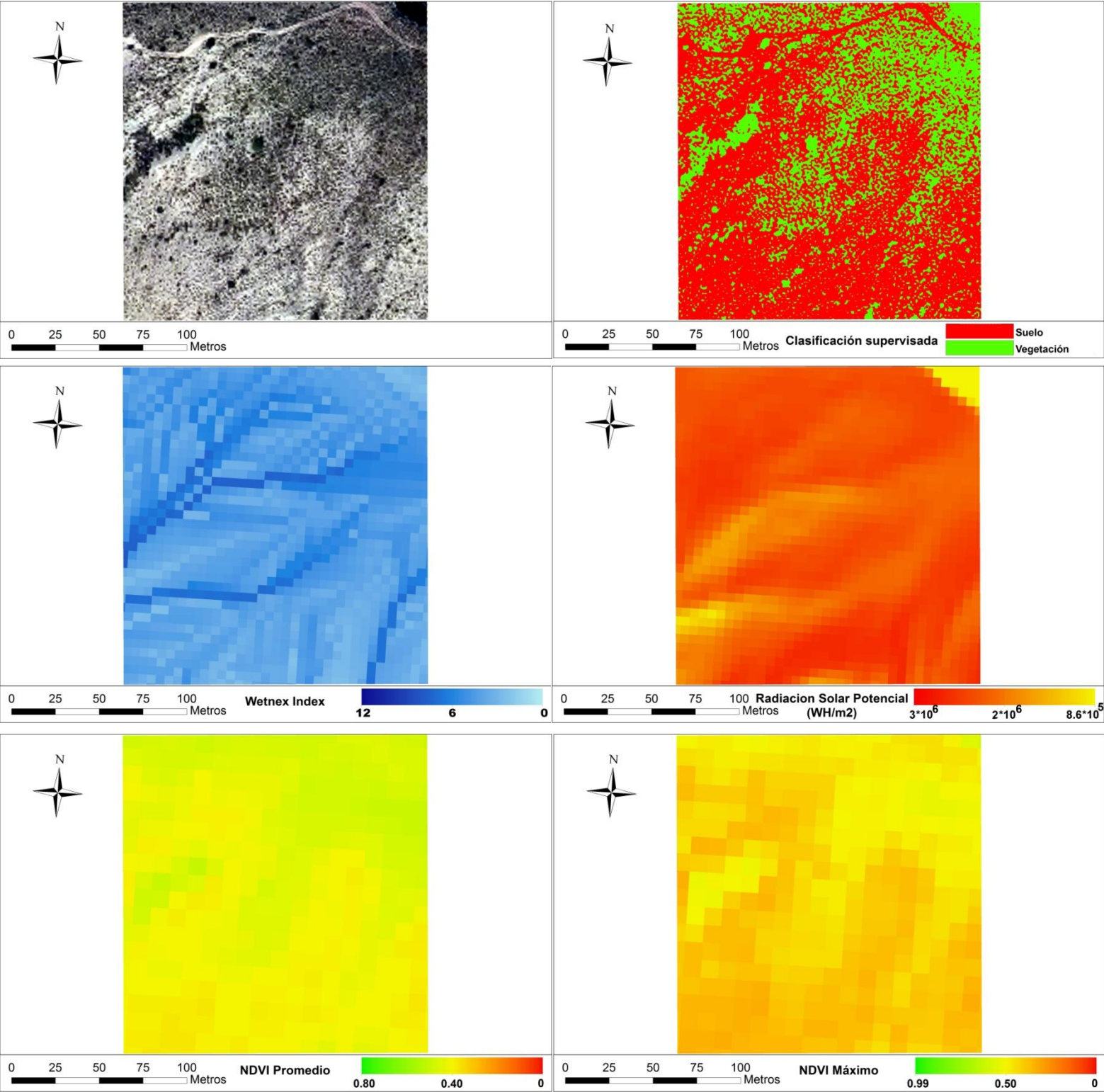
Nombre de la parcela: Peñarrubia
UTM (WGS): 30S 4273369 690049
Altura: 769 m.s.n.m.

Precipitación media anual: 350 mm/año
Tª media: 14 °C
Área: 9.13 Ha



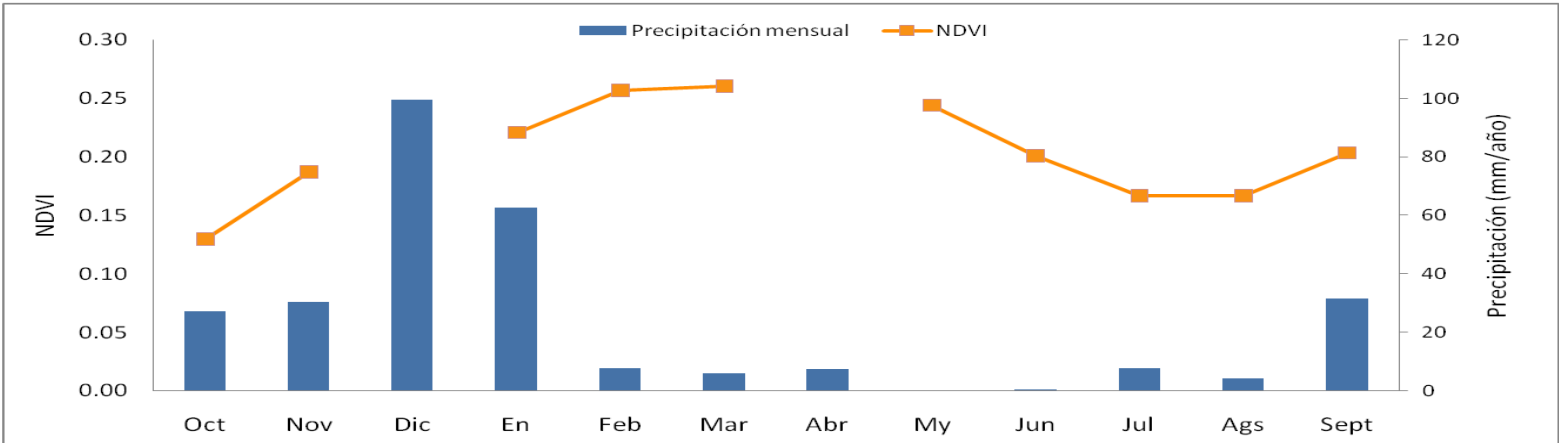
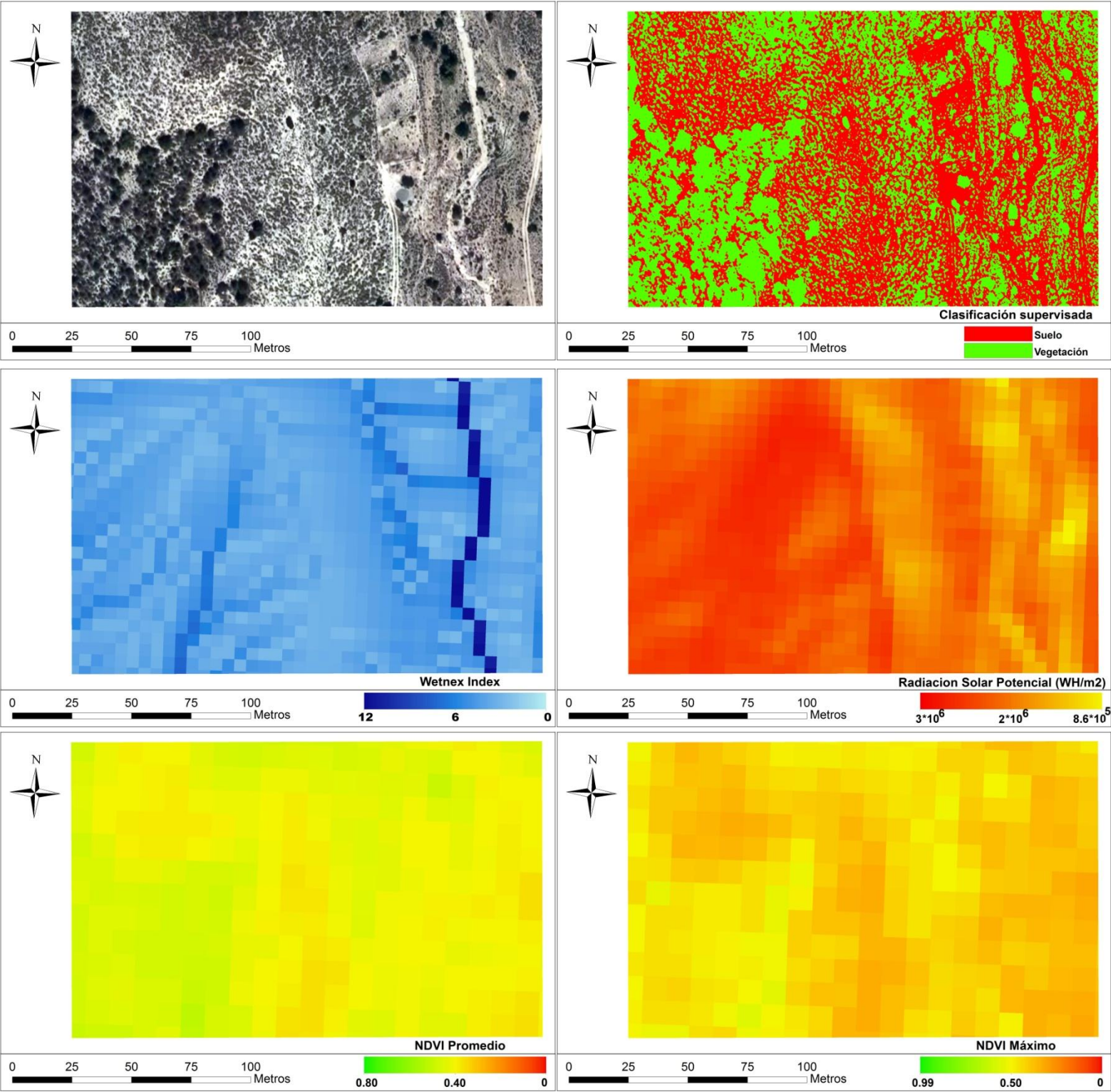
Nombre de la parcela: Rellou
UTM (WGS): 30S 4269297 735480
Altura: 395 m.s.n.m.

Precipitación media anual: 338 mm/año
Tª media: 16 °C
Área: 3.15 Ha



Nombre de la parcela: Ventós 1
UTM (WGS): 30S 4259539 707657
Altura: 468 m.s.n.m.

Precipitación media anual: 311 mm/año
Tª media: 16 °C
Área: 2.45 Ha



Nombre de la parcela: Ventós 2
UTM (WGS): 30S 4260475 707395
Altura: 550 m.s.n.m.

Precipitación media anual: 322 mm/año
Tª media: 15 °C
Área: 4.12 Ha

